

千葉工業大学

博士学位論文

無機系注入式あと施工アンカー材の
接着特性に関する実験的研究

平成29年3月

安藤重裕

論文要旨

接着系あと施工アンカーには、エポキシ樹脂やエポキシアクリレート樹脂等の有機系アンカーが多く使用されているが、耐熱性、耐アルカリ性等の耐久性の点からは、有機系材料より無機系材料の方が好ましいと考えられる。しかし、無機系あと施工アンカーの歴史は浅く、その特性において不明な点も多い。その特性を把握するためには、接着メカニズムを明らかにする必要がある。また、2012年12月に発生した笹子トンネル天井板崩落事故により、接着系あと施工アンカーの耐久性の評価が急務となっており、クリープ性能に対する評価手法の確立が望まれている。

そこで、本研究では、無機系注入式あと施工アンカーに関して、無機系アンカー材の材料物性値がアンカーの付着性能に及ぼす影響を調べ、無機系アンカーの一つである超速硬セメント系注入式あと施工アンカー材の接着特性と長期持続荷重下における性能について、実験的に検討し、無機系あと施工アンカーの付着メカニズムの解明およびあと施工アンカーの長期持続荷重下における性能の試験方法、評価手法の確立を目的とした。

無機系あと施工アンカーの材の接着特性を調べるため、アンカー材の材料配合を変化させて、材料強度の影響、膨張材の影響、乾燥収縮率の影響、保水性能の影響について、付着強度との関係を検討した。アンカー材の付着性能について、アンカー材の保水性能とアンカー筋の引抜き付着強度に相関性があることを明らかにし、コンクリート-アンカー材界面に形成される脆弱層が、付着強度に大きく関係することを解明した。また、アンカー材に膨張性能を保有させることにより、コンクリート-アンカー材界面に脆弱層が形成された場合でも脆弱層を低減させる効果により、付着強度は、膨張性能を有しないものより高くなるものの、アンカー材の保水能力が低い場合には、付着強度のばらつきは大きいことを示した。これらのことから、無機系注入式あと施工アンカー材の評価基準の試験項目として、保水率試験が必要であることを提示した。

無機系注入式あと施工アンカーで主流となっている超速硬セメント系注入式あと施工アンカーについて、材料の基本物性値を把握し、アンカー材としての付着力の検証を行った。超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着強度は、コンクリート強度 $20\sim 50\text{N/mm}^2$ の範囲において、あと施工アンカーの設計において使用される基本平均付着強度 ($\tau_{avg}=10\sqrt{f_c/21}$) の1.6倍以上であった。また、上向き、横向き、下向きの施工方向の違いについて、施工方向による付着強度に差は認められず、付着強度は約 27N/mm^2 以上であり、変動係数は5%以下と小さなものであった。

あと施工アンカーの長期持続荷による影響を調べるために、ばね式クリープ試験装置を新たに製作し、その装置を用いて長期持続荷重が注入式あと施工アンカーのクリープ現象へ及ぼす各種要因について検討した。

製作したクリープ試験装置の検証では、載荷開始前から目標載荷荷重到達時までの荷重変位曲線は引張強度試験とほぼ同等であり、更に長期持続載荷試験において、クリープ変

形量と回復クリープ量が同等であることが確認され、これまであと施工アンカーでは測定されてこなかった回復クリープの測定を可能とした。

長期持続荷重によるアンカー筋の拔出し量は、コンクリート強度の影響を大きく受け、載荷荷重比 50%において、母材コンクリート強度 24N/mm^2 のアンカー筋の拔出し量は、 46N/mm^2 のコンクリートの 2 倍程度であることを示し、コンクリート強度が大きくなるにともない、クリープ速度は小さくなることを明らかにした。

クリープ破壊直前の変位は、いずれの試験体においても付着強度試験の最大耐力時の変位より大きくなり、そのクリープ破壊時の変位は、クリープ破壊に至る時間が長いほど、増大する傾向が判明し、弾性ひずみにクリープひずみ加わるためと推測された。

鉄筋径の違いによるクリープ挙動への影響について、載荷荷重比の増加量に対する変位の増加割合は、鉄筋径によらず同等であることが確認された。しかし、載荷荷重があと施工アンカーのクリープ変形の絶対量に影響を与えることが判明し、載荷荷重比が同一であっても、クリープ変形量は鉄筋径が大きいものの方が大きくなった。このことから、載荷荷重比と載荷荷重の両者を考慮する上で必要があることを示した。

載荷荷重比によるクリープ挙動の検討から、クリープ破壊が生じない限界の荷重であるクリープ限度は、無機系あと施工アンカーでは載荷荷重比 0.6~0.7 程度、有機系あと施工アンカーのクリープ限度は載荷荷重比 0.5 程度であることを明らかにした。

実験により得られたクリープ曲線とクリープ破壊線図から、長期におけるクリープ変形量の推定方法を検証した。クリープ曲線から長期のクリープ変形量を予測する場合、クリープ曲線の推定に適用する推定式は、有機系アンカーでは EOTA ETAG 001 Part5 で適用されている指数関数が、無機系アンカーでは JIS A1157 のコンクリートの圧縮クリープで適用されている対数関数を適用した場合に、クリープ破壊線図とクリープ曲線からの推定式が同等になることを突き止め、クリープ曲線からの長期の変位推定に適用する推定式を提案した。

これらの結果より、クリープ限度の推定とクリープ曲線からの長期における変形量推定を組み合わせたクリープ評価方法の検証を行い、この評価方法により有機系あと施工アンカーおよび無機系あと施工アンカーのクリープ評価が可能であることを示した。

以上のように本論文では、これまで提示されていなかった無機系注入式あと施工アンカーの付着メカニズムを明示し、あと施工アンカーの長期持続荷重下における各種要因がクリープ変形量に与える影響を把握し、あと施工アンカーのクリープ評価方法を新たに提示した。

Abstract

Organic adhesive of post-installed bonded anchor such as epoxy resin and epoxy acrylate resin are almost used. However inorganic adhesive has a performance advantage of durability such as heat resistance and alkali resistance. As for inorganic adhesive of post-installed bonded anchor, As for inorganic adhesive of post-installed bonded anchor, The capsule type was developed in 2004, the injection type was developed in 2010 in Japan. Therefore there are many unknown points in their characteristics.

In this study, material properties of inorganic-type anchor were investigated for the effect on bond strength. Furthermore, the tests of the adhesive properties and the behavior under the sustained loading of the ultra-rapid-hardening cement type post-installed anchor were performed. The purpose of this study is to elucidate adhesive mechanism of inorganic-type post-installed bonded anchor and to establish test method and evaluation method of the sustained loading for post-installed anchor.

At first, material properties and adhesion strength of inorganic-type anchor was examined. These results clarified that the water retention coefficient and bond strength of inorganic-type post-installed anchor have a strong correlation. In this matter, the weak layer formed on the interface between the concrete and the inorganic anchor material was related to the bond strength. As a result, the ensuring stable performance of inorganic post-installed anchor material was showed that a water retention coefficient required more than 80%.

For ultra-rapid hardening cement-type post-installed bonded anchor, bond strength tests were carried out using three types of deformed bar. Bond strength of the ultra-rapid hardening cement-type post-installed anchor was more than 1.6 times the basic average bond strength ($\tau_{avg} = 10\sqrt{\sigma_{B/21}}$). For tests performed on anchors installed in the downward, lateral and upward construction, bond strengths were almost same in spite of the installation direction. Furthermore a variation coefficient of bond strength was less than 5%.

In order to examine the creep behavior of post-installed anchors, the spring-type creep test device was newly manufactured and the verification of the test equipment has been made.

The creep tests of post-installed anchor were carried out under the several factors. Anchor movement of post-installed anchor under sustained loading was influenced on concrete strength. Anchor movement on concrete strength 24N/mm^2 showed about twice on concrete strength 46N/mm^2 at stress level 50%.

As for the creep failure, displacement at creep failure was larger than the displacement at the ultimate load of the bond strength test. In the case that the time reaching at the creep failure was longer, displacement at the time creep failure was larger.

Regarding the effect on rebar diameter, the rate of increase of the stress

level-displacement relation was the same in spite of the rebar diameter. Nevertheless in the case of different rebar diameter at the same stress level, the applied load was found to affect the absolute amount of creep deformation. Hence in performing the creep test, it is necessary to consider both the applied load and the stress level.

Creep limit is defined the maximum stress level without creep failure. As the results of several stress level, the creep limit was estimated 0.6 to 0.7 of the stress level in the inorganic-type post-installed bonded anchor and 0.5 of the stress level in the organic-type.

The creep deformation was evaluated from the creep curve. Estimation equation of creep deformation was calculated using the exponential function in EOTA ETAG 001 Part5 and the logarithmic function in JIS A 1157.

I conclude that the application of the exponential function is fit with the organic-type bonded anchor and that of the logarithmic function is fit with an inorganic-type anchor.

目次

| | |
|--|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 研究の背景 | 2 |
| 1.2 本研究の目的 | 7 |
| 1.3 用語の定義 | 8 |
| 1.4 本研究に関連する既往の研究 | 9 |
| 1.5 研究の範囲 | 20 |
| 1.6 論文の構成 | 20 |
| 第1章の参考文献 | 22 |
| 第2章 無機系注入式あと施工アンカーの付着メカニズム | 25 |
| 2.1 序論 | 26 |
| 2.2 無機系注入式あと施工アンカーの物性と アンカーの付着に関する検討 | 27 |
| 2.3 無機系注入式あと施工アンカー付着メカニズム推定 | 37 |
| 2.4 無機系注入式あと施工アンカーの評価基準の提案 | 40 |
| 2.5 第2章 まとめ | 43 |
| 第2章の参考文献 | 44 |
| 第3章 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの開発 | 45 |
| 3.1 序論 | 46 |
| 3.2 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの基本物性 | 47 |
| 3.3 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着に関する検討 | 52 |
| 3.3.1 基本平均付着強度の評価 | 52 |
| 3.3.2 付着強度のばらつき評価 | 56 |
| 3.3.3 穿孔径の影響に関する検討 | 63 |
| 3.4 第3章 まとめ | 66 |
| 第3章の参考文献 | 67 |
| 第4章 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの 長期持続荷重に関する評価 | 69 |
| 4.1 序論 | 70 |
| 4.2 クリープ試験装置の検証 | 71 |
| 4.3 超速硬セメント系注入式アンカーの長期持続荷重に関する検討 | 84 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4. 3. 1 | コンクリート強度があと施工アンカーに 及ぼす影響に関する検討 . . . | 84 |
| 4. 3. 2 | 鉄筋径があと施工アンカーに及ぼす影響に関する検討 . . . | 99 |
| 4. 3. 3 | 非拘束試験によるあと施工アンカーの クリープ挙動に関する検討 . . . | 105 |
| 4. 3. 4 | 有機系材料との比較検討 | 110 |
| 4. 4 | クリープ評価方法の検討 | 119 |
| 4. 5 | あと施工アンカーのクリープ試験方法および評価方法の提案 . . . | 130 |
| 4. 6 | 第4章 まとめ | 134 |
| | 第4章の参考文献 | 136 |
| | 第5章 結論 | 137 |
| 5. 1 | 本研究における結論 | 138 |
| 5. 2 | 今後の課題 | 140 |
| | 本論文に関連する著者の発表論文・報告 | 141 |
| | 謝辞 | 145 |

第1章

序論

1.1 研究の背景

(1) あと施工アンカー使用についての現状

2006年7月にアメリカ合衆国マサチューセッツ州ボストンの高速道路のテッド・ウィリアムズトンネル（ビッグディグ）で天井板が崩落し、死亡事故が発生した。米国国家運輸安全委員会の報告書では、事故の主原因は、天井板の取り付けに使用したあと施工アンカーのエポキシ樹脂のクリープによるものと報告した [1-1]。日本においては、2012年12月に中央自動車道笹子トンネルにおいて天井板崩落事故が発生し、天井パネルに使用されたあと施工アンカーの施工不良、設計不良、長期における樹脂の劣化が指摘された[1-2]。しかしながら、あと施工アンカーは、アンカー筋を正確な位置に精度よく設置することが可能であり、施工性も容易であることから、既存コンクリート構造物に構造部材、設備などを固定する上であと施工アンカーは必要不可欠なものであり、今後も使用され続けると考えられる。このため、あと施工アンカーの利用について、安全性の確保が重要な課題の一つであり、使用においては高い信頼性が求められている。

あと施工アンカーは、金属系アンカー、接着系アンカーおよびその他のアンカー類に分類されており（図 1-1-1）、現在、建築用、土木用を含めてあと施工アンカーとして年間5億本以上が使用されている。

一般的に用いられている接着系アンカーは、エポキシアクリレート樹脂やエポキシ樹脂等の有機系アンカーであり、強固な固着力を保有し、引抜き力は金属拡張系アンカーより優れている。そのため増築改修用差筋・耐震補強などの建築工事、設備機器・ブラケット設置などの設備工事、橋梁や港湾の土木工事など建設工事のあらゆる分野で使用されている。

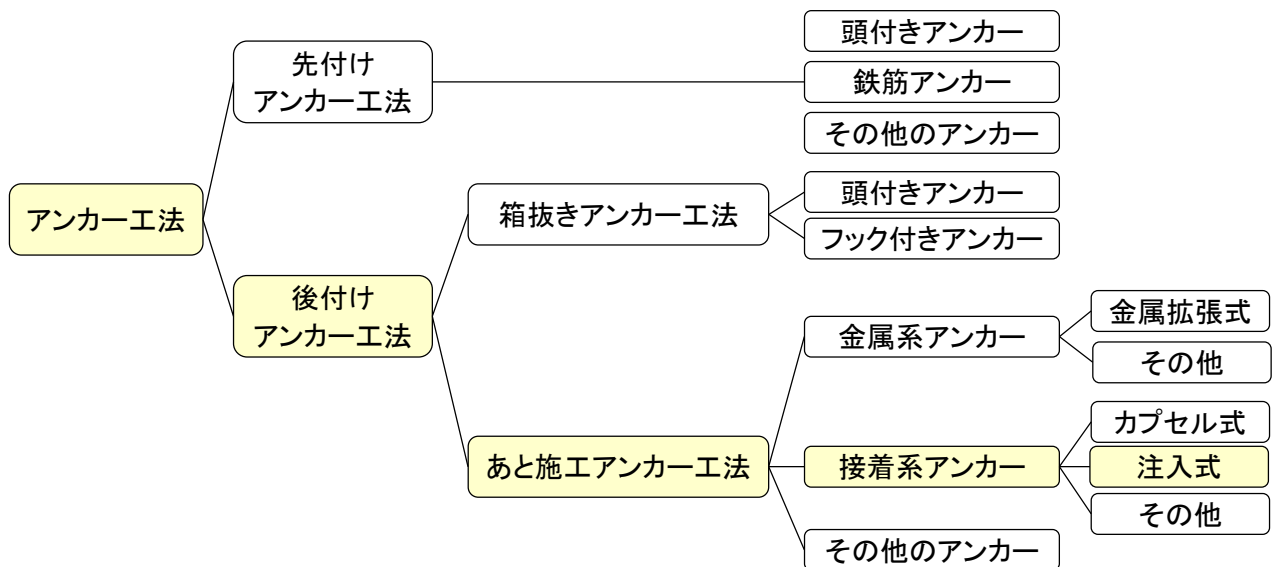


図 1-1-1 アンカーの分類

接着系アンカーはドイツから技術が導入され、日本で生産が開始されたのが1969年である。当初、カプセル式アンカーが主流であったが、1980年代終わりごろからカートリッジ型が使われ始め、その後製品数が増加し続けている（図1-1-2）[1-3]。

耐熱性能や耐アルカリ性能などの長期的性能の点では、有機系材料より無機系材料の方が材料劣化に対する抵抗性が高く、耐久性能は高いものと考えられる。有機系あと施工アンカーは欧米において数多くの使用実績があり、日本では最初に有機系あと施工アンカーが輸入されて使用され始めたため、無機系あと施工アンカーは開発されてこなかった。

無機系アンカーについて、箱抜きアンカーでは、アンカー筋の定着のためにセメント系材料が古くから使用されている。箱抜きアンカーは、アンカーボルトに対する孔径が大きく、道路橋支承便覧[1-4]では、孔径を“ $3d$ (d :アンカー筋径) または $d+100\text{mm}$ のどちらか大きい方以上”としている。一方、あと施工アンカーの一般的な穿孔径は、 $1.2\sim 1.4d$ 程度である。無機系アンカーは、孔径の小さなものへの材料の注入が難しく、また、孔径の小さなものはコンクリートとアンカー材の接触面積が小さいため、十分な付着力が確保できない可能性があるものと推測され、あと施工アンカーにセメント系材料は適用されてこなかった。また、欧州等ではセメント系材料の収縮による付着強度低下の懸念より、セメント系あと施工アンカー材は一般的には用いられていない。

2000年以降に無機系あと施工アンカーのカプセル式アンカーが開発され、2010年以降には注入式アンカーが使用されるようになり、徐々に無機系あと施工アンカーの製品数が増加しつつある（図1-1-2）[1-3]。

アンカーに使用されるセメントの分類を図1-1-3に示す[1-5]。無機系あと施工アンカーに使用されるセメントは、ポルトランドセメントの他に、アルミナセメント、超速硬セメント、リン酸塩系セメント、水ガラス系セメントが使用されている。ポルトランドセメント以外のものは、いずれも急硬性、速硬性を保有するものである。アルミナセメントや超

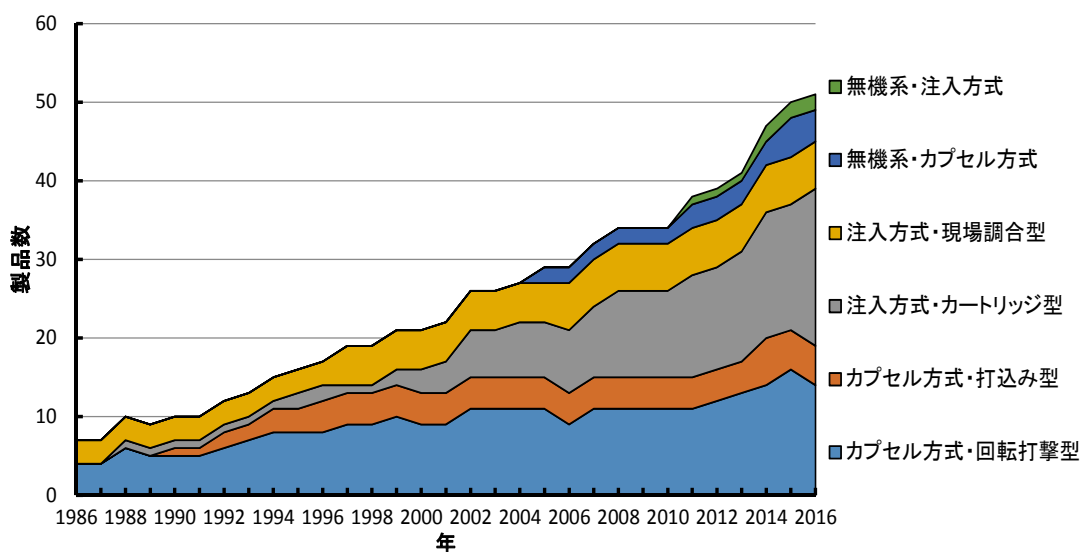


図1-1-2 接着系アンカーの施工方式の変遷[1-3]

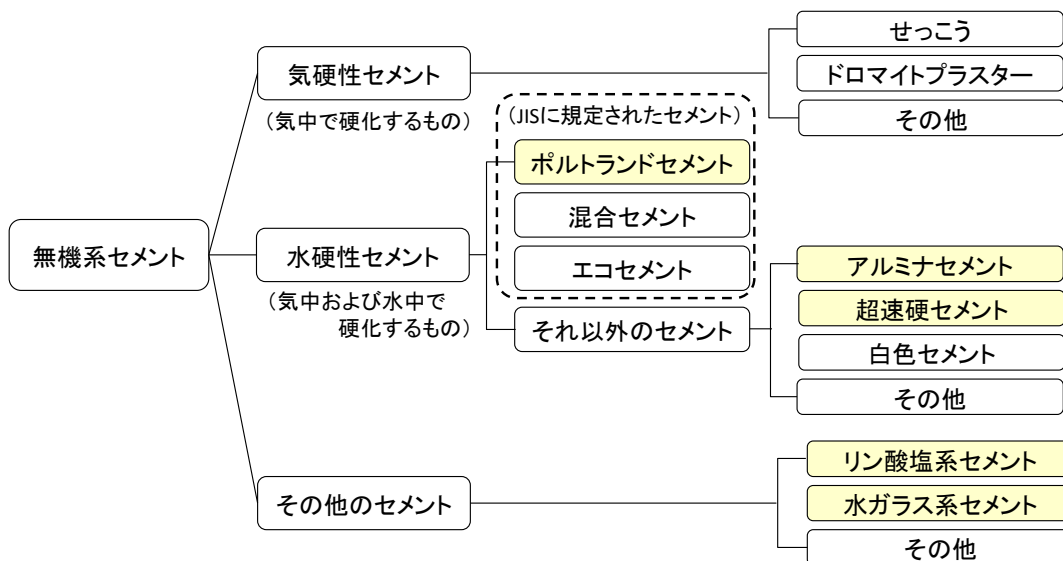


図 1-1-3 無機系アンカーに用いられるセメント[1-5]

表 1-1-1 無機系あと施工アンカーの主成分

| 主成分 | 硬化剤 | タイプ |
|--------------------|----------|----------|
| ポルトランドセメント | ケイ酸ナトリウム | ガラス管カプセル |
| 早強セメント+混和材 | 水 | 紙カプセル |
| 膨張性急硬セメント | 水 | 紙カプセル |
| リン酸アンモニウム+酸化マグネシウム | 水 | ガラス管カプセル |
| 超速硬セメント | 水 | ガラス管カプセル |
| 超速硬セメント | 水 | 注入式 |
| ポルトランドセメント | 水 | 注入式 |

速硬セメントは、緊急時の補修材料と使用されている。リン酸塩系セメントは耐火材料として使用されており、水ガラス系セメントは、止水材として用いられている。

日本で販売された無機系アンカーの種類を表 1-1-1 に示す。無機系アンカーの製品には、様々な混和剤が添加されていると推定され、その一つとして膨張材を添加したものが販売されているようである。

有機系アンカーの年代別の接着剤の種類（主材）の変遷を図 1-1-4 に示す[1-6]。現在では、エポキシ樹脂およびエポキシアクリレート樹脂（ビニルエステル樹脂）が多く用いられている。硬化剤として、エポキシ樹脂には、ポリアミンが用いられることが多く、エポキシアクリレート樹脂では、主に過酸化ベンゾイルが用いられている。セメント系では、ポルトランドセメント系と超速硬セメント系が主に使用されている。

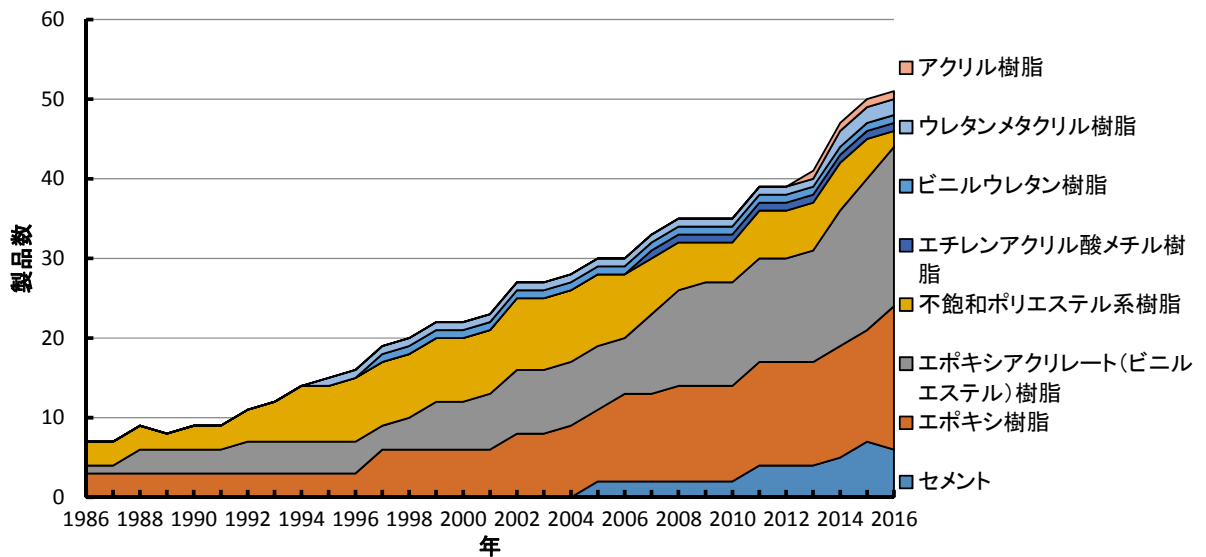


図 1-1-4 有機系アンカーの接着剤種類の変遷[1-6]

(2) あと施工アンカーの品質性能

あと施工アンカーの安全性を確保するための品質性能の審査に関して、日本では日本建築あと施工アンカー協会（JCAA）が実施している製品認証事業がある。JCAAで行っている製品認証事業は、JCAAが定めた製品認証事業規定に基づき、製品の品質管理、製品性能、施工仕様、販売・流通体制などについて審査を行っている。付着性能に関しては、引張性能、せん断性能等の短期的性能について、第三者機関で行った試験について審査を実施している。しかし、長期耐久性についての評価は行われていない。近年、長期的な性能評価が求められており、2015年10月にJR東日本では、「JR東日本 土木工事標準仕様書」[1-7]において耐アルカリ性および持続荷重に対する評価の項目が追加された。これらの追加された項目は、ACI 355-4.11[1-8]やEOTA ETAG 001 Part5 [1-9]での評価方法を参考に、試験を実施し、規格値を定めている。

表 1-1-2 に日本における無機系アンカー材の試験項目と規格値を示す。ここでは、日本建築あと施工アンカーの「あと施工アンカー・品質基準（金属系・接着系）」[1-10]、「各種合成構造設計指針・同解説」[1-11]、「JR東日本 土木工事標準仕様書」[1-7]における規格値を示した。「あと施工アンカー・品質基準（金属系・接着系）」では、圧縮強さと曲げ強さを規定しており、「各種合成構造設計指針・同解説」には圧縮強度のみとしているが、圧縮強度の規格値は「あと施工アンカー・品質基準（金属系・接着系）」の規格値より高い値となっている。「JR東日本 土木工事標準仕様書」では、圧縮強さ、曲げ強さの他に、膨張率、ブリーディング率、クリープを定めている。膨張率とブリーディング率は、無収縮グラウトの材料規格において設定されている試験項目である。この試験項目は、無機系アンカーの付着特性に与える影響が明確ではなく、一般的に適用されているグラウト材料の規格を無機系アンカーに適用しているものと考えられる。また、圧縮強度、曲げ

表 1-1-2 無機系アンカー材の試験項目と規格値

| 試験項目 | 日本建築 あと施工アンカー協会 あと と施工アンカー・品質基準 | 各種合成構造設計 指針・同解説 | JR 東日本 土木工事 標準仕様書 |
|----------|---------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 圧縮強さ | 29.4N/mm ² 以上 | 50.0N/mm ² 以上 | 29.4N/mm ² 以上 |
| 曲げ強さ | 4.9N/mm ² 以上 | - | 4.9N/mm ² 以上 |
| 膨張率 | - | - | 7 日で収縮を 示さないこと |
| ブリーディング率 | - | - | 0.0% |
| クリープ | - | - | 試験により規格値を 満たすこと |

表 1-1-3 EOTA ETAG 001 Part5 に示されている無機系アンカーの識別[1-9]

| | |
|---|---------------------------|
| 1 | 化学分析値 |
| 2 | 結合材量 |
| 3 | 粒度分布 |
| 4 | 密度 |
| 5 | 脱水率 |
| 6 | 凝結試験 |
| 7 | 収縮および膨張試験 |
| 8 | 曲げおよび圧縮強度（材齢 7 日および 28 日） |
| 9 | 強熱減量およびアッシュ含有量 |

強さ、膨張率、ブリーディング率についてのバックグラウンドとなるデータは、確認されておらず、これらの規格値の妥当性の検討が必要と考えられる。

欧米における材料の確認項目は、硬化物の品質や同一性を確認するための検証として行われており、そのため、材料に対する規格値は存在しない。表 1-1-3 に EOTA ETAG 001 Part5 [1-9] に示されている無機系アンカー材の識別を示す。化学分析値、結合材量などを確認することにより材料の同一性の評価が行われている。アンカー材としての物性評価については、標準条件下における引張強度試験の他に、施工条件、環境条件の影響に対する確認試験を行い、アンカーとしての性能評価および製品の認証が行われている。

欧米においては性能規定によりアンカーが使用されているが、日本においては仕様規定

が前提となっている。そのため、アンカーの使用において、適切なアンカー材の規格値を設定する必要があり、無機系アンカー材に対しては、適正な規格値の提示が望まれている。

無機系アンカー材をより安全に使用するためには、規格値の整備だけでなく耐久性に関するデータを蓄積していく必要がある。現在、各種機関においてあと施工アンカーの設計基準の改訂作業が進められつつある。特に耐久性の評価については、先行して知見が得られている欧米の事例を参考にしつつ、母材となるコンクリートのひび割れの影響、クリープ、疲労、耐薬品性などの耐久性に関するデータの収集及び評価方法の開発、検証が進められている。欧米では、評価が有機系材料を対象としているため、これらの評価方法が、無機系アンカーに適用可能か検討が必要である。

1.2 本研究の目的

無機系注入式あと施工アンカー材の品質規格値に対して、その品質規格値の妥当性が不明であり、その品質規格値を制定するためのデータを提示していく必要がある。また、耐久性能に関する評価については、その評価手法の議論が十分ではなく、特に長期持続荷重に対する安全性については、クリープに対する評価方法の確立が急がれている。

そこで本研究では、無機系注入式あと施工アンカーに必要な品質性能の把握、無機系アンカーの一つである超速硬セメント系注入式あと施工アンカー材の付着特性の把握およびあと施工アンカーの長期持続荷重下における性能の試験方法、評価手法の確立を目的として、実験的に検討を行った。

1.3 用語の定義

本論文において用いている用語および用語の意味を以下に述べる。

- ・ 付着破壊 接着系アンカーで，コンクリートと接着剤の界面，または接着剤とアンカー筋の界面でアンカー筋が抜ける破壊モード
- ・ コーン状破壊 アンカーが母材を円錐状に破壊する破壊モード
- ・ 付着試験 アンカーの付着破壊が先行するように行うアンカーの引抜き試験。載荷面に穿孔径より若干大きい内径を持つ反力板を設置することにより，アンカーの付着破壊を発生させる。
- ・ 引張試験 アンカーの破壊モードをアンカー筋破断，付着破壊またはコーン状破壊のいずれかが発生するアンカーの引き抜き試験
- ・ 拘束試験 付着試験と同義。
- ・ 非拘束試験 引張試験と同義。コンクリートのコーン状破壊を想定し，想定するコーン状破壊が発生する径より外側に反力をとる試験
- ・ 箱抜きアンカー 母材コンクリートを打込む前に所定の埋め込み位置に型抜き部材などを設置し，硬化後型抜き部にアンカーをセットしてモルタルなどにより固着するアンカー
- ・ 非回復クリープ 永久ひずみ。クリープ試験後，無負荷にしたときに残留する変形
- ・ 遷移クリープ クリープ試験の初期において，ひずみ速度が次第に減少する段階
- ・ 定常クリープ クリープ試験において，ひずみ速度がほぼ一定になる段階
- ・ 加速クリープ クリープ試験の後期において，クリープ速度が増加し破断に至る段階
- ・ 載荷荷重比 長期持続載荷試験における最大耐力に対する載荷荷重の割合
- ・ クリープ限度 長期においてクリープ変形量が不変となるクリープ破壊が発生しない最大荷重
- ・ クリープ速度 定常クリープ期におけるひずみ速度
- ・ 保水率 セメント系材料のフレッシュ時における水分の保持能力
- ・ ドライアウト コンクリート界面で発生するセメント系材料から急激にコンクリート側へ水分が移動することによるセメント系材料の部分的な乾燥状態

1. 4 本研究に関連する既往の研究

無機系材料のアンカーへの適用について、箱抜きアンカーには現場調合モルタルが使用されてきた。しかし、穿孔径の小さいあと施工アンカーに対して、現場調合のモルタルは、施工性、付着不良等により使用されてこなかった。しかし、2000年ごろより、無機系カプセル式あと施工アンカーが開発されて使用されはじめた。さらに無機系注入式あと施工アンカーはさらに新しく実用化されたのは、2010年である。このように無機系アンカーの歴史は、15年程度と浅く、無機系あと施工アンカーに関する報告例が少ない。しかし、有機系アンカーや無機系材料の接着に関する研究は数多く行われており、ここでは、有機系アンカーや無機系材料の接着に関する研究を含めた既往の研究について、以下に記載する。

1. 4. 1 無機系アンカーの接着に関する研究

無機系材料が箱抜きアンカーへ使用されることは数多くあるものの、穿孔径の小さいあと施工アンカーへの使用はまだ少ない。そのため、無機系あと施工アンカーに関する報告例は少なく、無機系あと施工アンカーに関する接着メカニズムについては、全く議論をされていない。

ここでは、有機系接着剤の接着メカニズム、有機系アンカーの接着メカニズムについて、提案されている説について述べ、その後に無機系アンカーの付着性能に関する論文と無機系材料の付着性能についての論文について、その要旨を記載する。

(1) 有機系接着剤、あと施工アンカーの接着メカニズム

あと施工アンカーにおいて、アンカー材はアンカー筋と母材コンクリートをつなぐための接着剤として機能している。接着剤の素材による分類を図1-4-1に示す[1-12]。有機系接着剤には多くのものがあるが、有機系アンカー材の接着剤には樹脂系が用いられている。

図1-4-2に接着剤の接着機構[1-13]を、図1-4-3に提案されているあと施工アンカーの接着機構[1-11]を示す。接着剤の接着機構は、機械的結合、物理的結合と化学的結合によるものが考えられており、これらの結合が複合的に絡み合っって接着力が働くものと考えられ

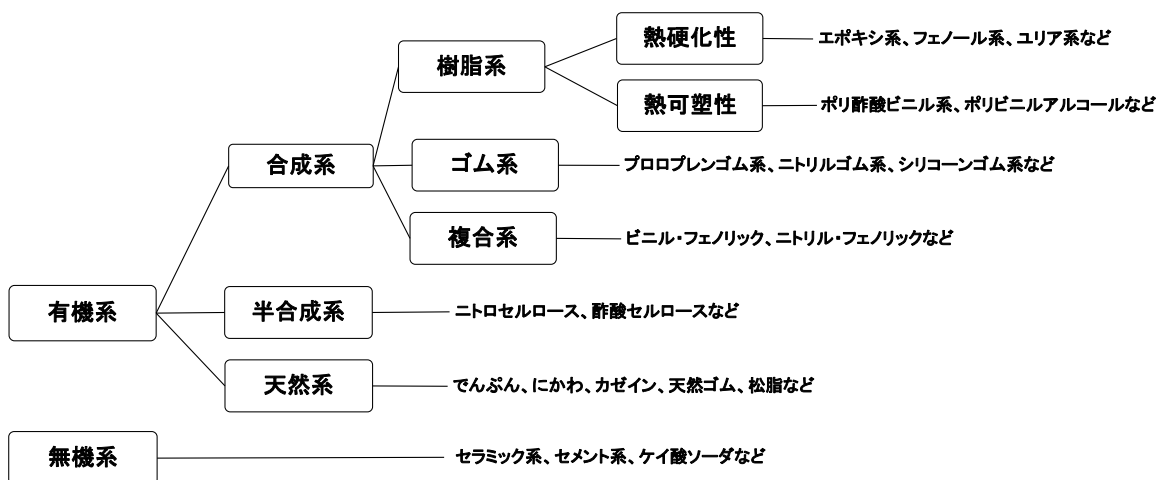


図 1-4-1 接着剤の素材による分類[1-12]

る。

あと施工アンカーの接着機構は、機械的結合によるものが主な付着機構として提案されている。有機系アンカー材のエポキシ樹脂系アンカーでは、エポキシ基の開環反応による化学的結合が生じていることが推測され、有機系アンカーにおける接着機構は、一般的な有機系接着剤と同様に、機械的結合の他に物理的結合と化学的結合が絡み合っているものと推測される。

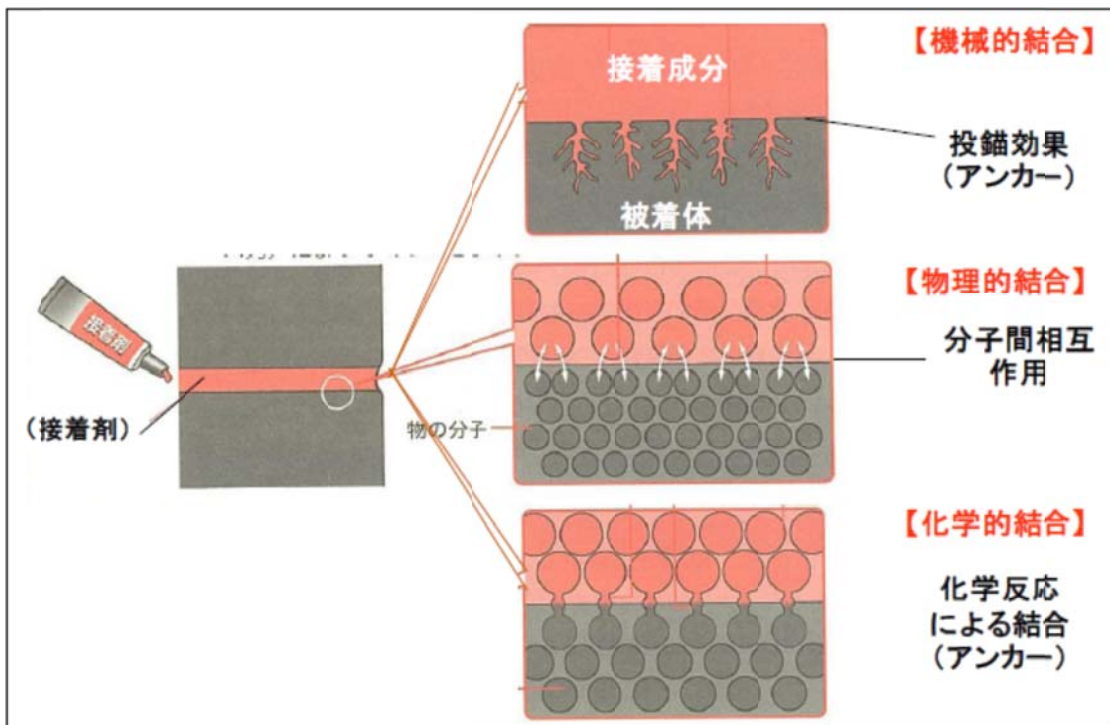


図 1-4-2 有機系接着の機構[1-13]

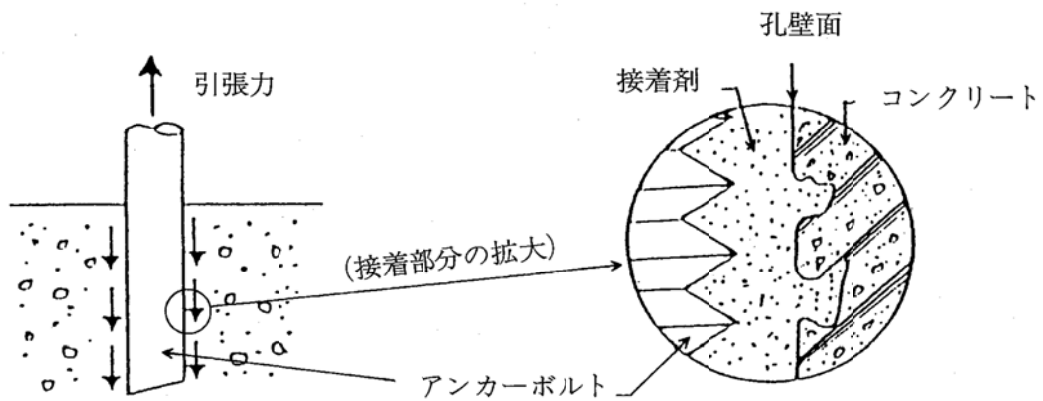


図 1-4-3 あと施工アンカーの機構[1-11]

(2) 無機系アンカーの既往の研究における知見

浜田ら[1-14]は、「穿孔セメントモルタル充填式あと施工アンカーボルトの応力と耐力について」の中で、M12～M20の頭付きアンカーボルトについて、充填材として(C:S:F=1:1:0.25 W/C=0.46)を用い、穿孔径50～160mm、埋込み長さを50～170mmとして、穿孔側面の付着応力について検討して、以下の結果を得ている。

- ・埋込み長さが小さい場合、充填モルタルがそのまま抜け出すが、埋込み長さが大きく最大荷重が比較的大きい場合は、抜出し破壊が起こったものでも、充填モルタルは圧壊する。
- ・ボルトが破断する埋込み長さは、充填モルタルを用いた場合、ボルト径の約10～17倍以上必要である。

小原ら[1-15]は、「アンカー孔壁面を目荒し処理した無収縮モルタル接着系あと施工アンカーの付着強度に関する実験的検討」の中で、強度の異なる無収縮モルタルを用いて、Tヘッドバー型のアンカー筋(D19 埋込み長さ10da)を定着させ、孔表面を目荒し処理し、付着強度を測定して、以下の結果を得ている。

- ・アンカー孔表面を目荒し処理を施し、無収縮モルタルによりアンカー筋を定着させたあと施工アンカーは、高い定着耐力を有する
- ・土木学会標準示方書設計編による付着強度式は、 $f_{bo}=0.28f'_c{}^{2/3}$ で示され、試験における付着強度についてもグラウト材の強度2/3乗と強い相関がある。

村山ら[1-16~1-18]は、「無機系あと施工アンカーの基礎的性状」の中で、開発したガラス管タイプの無機系アンカーについて、基礎的な性状確認を行っている。アンカー筋はD16～D22を使用し、有効埋込み長さを7da程度として、以下の結果を得ている。

- ・付着強度について、D16の実験値は、耐震改修設計指針計算値の1.1～1.5倍、D19は、1.1～1.4倍、D22は1.3～1.5倍程度である。
- ・せん断耐力については、D16の実験値は、耐震改修設計指針計算値の1.4～1.9倍、D19は、1.5～1.7倍、D22は1.6倍程度であり、耐震改修設計指針による耐力式で安全側に評価できる。

(3) 無機系材料の付着性能に関する研究

無機系アンカーの接着性は、穿孔したコンクリートと注入材料の接着により機能を維持する。既存コンクリートとモルタルとの付着について、「イラストで見るコンクリート構造物の維持と補修(ピーターH・エモンズ著)」[1-19]では、図1-4-4のように示している。ここでは、既存コンクリートとモルタルとの付着は、力学的なかみ合わせとファンデルワールス力により接着する機構が提案されている。

セメントモルタルの接着性については、施工方法、施工環境等の影響を受け、既存コン

クリートとモルタルの打ち継ぎ面での剥離の発生が生じることがある。このセメントモルタルの接着性を向上させるために、施工現場においては、ポリマーセメントが使用されている。そのため、セメントモルタルの付着に関する研究では、ポリマーセメントモルタルを使用した研究例の報告が多く見られる。

山本ら[1-20]は「再乳化型粉末樹脂を用いたポリマーセメントモルタルの付着性状（その2）」の中で、下地板として普通モルタル板と軽量モルタル板の2種類を用いて、セメント種類（普通ポルトランドセメントと超速硬セメント）、モルタルの施工厚さ（2,5,10mm）、温湿度条件が付着強度に及ぼす影響を調べている。

- ・施工厚さ2mmのモルタルを施工した場合、付着強度は低く、5mmおよび10mmの付着強度と比較して30~90%低下する。
- ・養生温度（5~35℃）、90~100%R.H.において養生したモルタルの付着強度は、養生温度に関係なく高く、養生湿度が低いほど低下する傾向となる。
- ・施工厚さが小さくなるにしたがって接着強度は低下するが、超速硬セメントを使用し

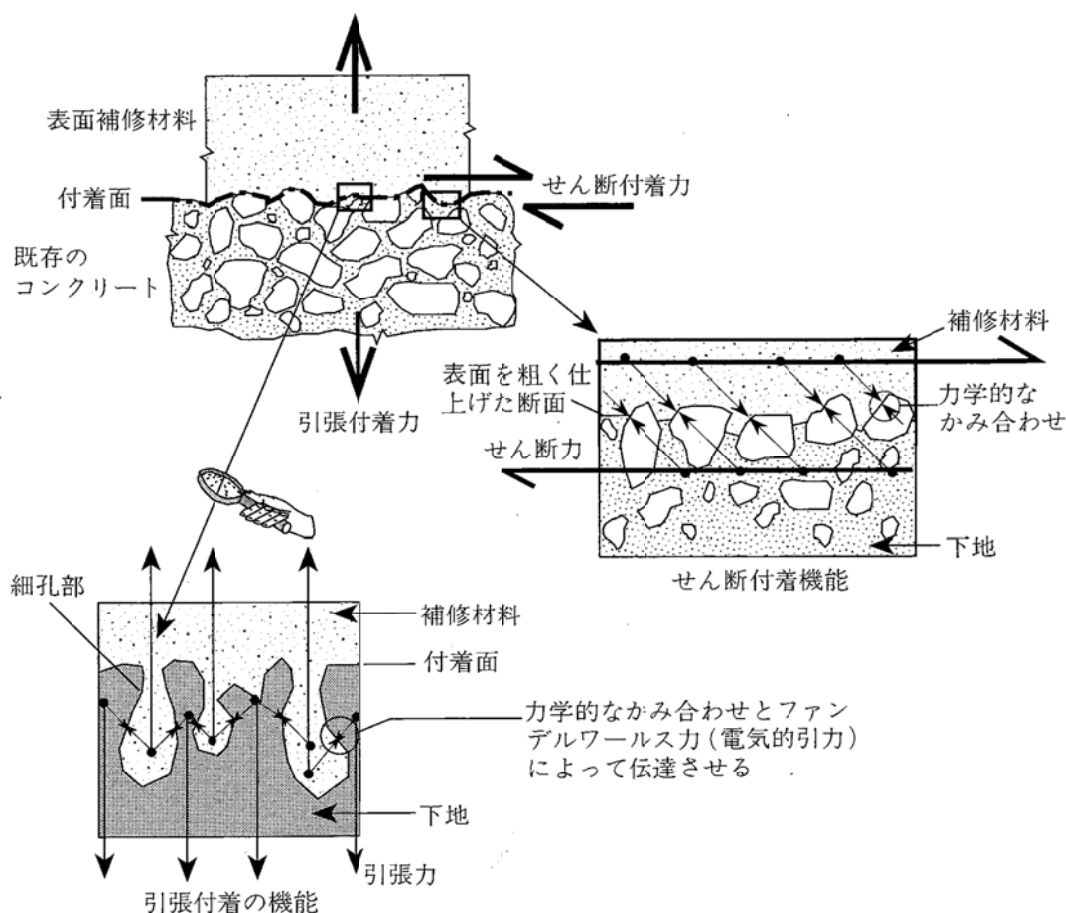


図 1-4-4 既存コンクリートと補修材料の付着[1-19]

た場合、普通ポルトランドセメントを使用した場合と比較して、施工厚さが小さくなることによる接着強度の低下量は小さい。

阿部ら[1-21]は、「ポリマーセメント系接着材によるモルタル塗り継ぎの接着性に関する研究」において、モルタルの打ち継ぎ時間までの工程間隔と接着強度を調べ、表層部および内部断面の電子顕微鏡観察を行い、以下の結果を得ている。

- ・打ち継ぎ感間隔が0.2時間以内では、モルタルの接着性は良好であり、電子顕微鏡で観察したモルタルの組織も緻密である。
- ・打継ぎ間隔が6時間以上ではポリマーセメントモルタル中の水分の下地への吸収および蒸発により、ポリマーセメントモルタル自体は、ドライアウトの状態となりセメントの水和が十分進行せず、ポーラスな構造となるであった。

榎原ら[1-22]は「ポリマーセメントモルタルの接着強度に及ぼすコンクリート下地処理法の影響」の中で、ポリマーセメントおよび打ち継ぐコンクリートの種類、水湿し等のコンクリート表面の下地処理方法による接着強度試験を行い、その影響を調べ以下の結果を得ている。

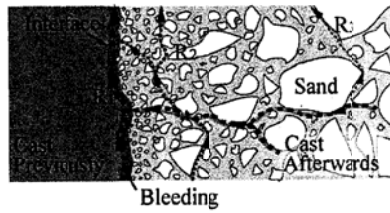
- ・ポリマーセメントの接着性状は、塗布するコンクリートの透水量に大きく関係し、透水量の多いコンクリートでは、モルタルからコンクリートへの水の移動が多く、打継ぎ界面でのモルタル中のセメントの水和が阻害されるドライアウト現象によって、塗布界面での接着破壊の割合が増加し、付着強度が低下して、ばらつきが大きくなる。
- ・透水量の多いコンクリートにおいてはポリマーセメントモルタルの保水係数が高いモルタルほど、塗布界面での水の移動が少なく接着強度が高くなる。

佐藤ら[1-23]は、「EPMA 分析に基づくコンクリートの鉛直打継ぎの界面処理に関する考察」の中で、打継ぎ界面近傍を EPMA によって観察し、脆弱層の形成機構の考察を行い以下の結果を得ている。

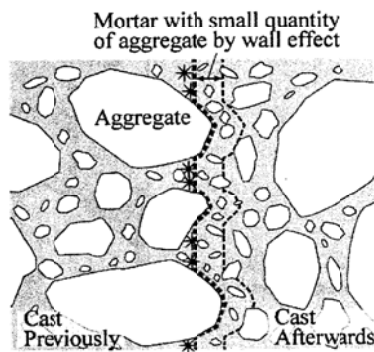
- ・コンクリート表面の Ca/Si 質量濃度比が 3.0 程度の所が脆弱層であり、その範囲を除去することにより付着性能が向上する。
- ・型枠が水みちとなり、目荒しを施さずに打継ぎをしたい場合には、水酸化カルシウムの厚い層ができる(図 1-4-5)。しかし、目荒しによって適切に処理した部分に打継ぎをすると、先打ち部表面を伝って後打ち部からブリーディングが生じるにも関わらず、脆弱層は形成しない。先打ち部の凸凹によって嵌合の強度と同時に後打ちで生じる脆弱層の分散にも寄与する。

(4) 既往の研究の課題

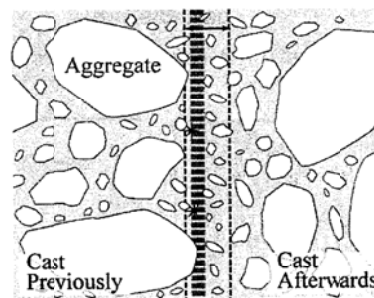
既往の研究では、無機系アンカーの接着性能について、鉄筋径、埋込み長さによる付着



Modeled bleeding mechanism near interface⁸⁾



(a) The age of substrate (cast previously) is 1day when jointed



* Unhydrated cement which remains near interface
 ||||| Calcium hydroxide generated by bleeding

(b) The age of substrate (cast previously) is 28days when jointed

図 1-4-5 コンクリートの鉛直打継ぎ界面の脆弱層の形成メカニズム[1-23]

強度へ与える研究が行われているが、材料性能と付着強度の関係について、検討は行われていない。

無機系材料のコンクリートと補修材料の界面における研究では、高い接着強度を発現するためには、躯体コンクリートに補修材料の水分が吸収されることによる補修材料のドライアウト現象を防ぐことが重要であること、界面部分の水みちに生じる水酸化カルシウムの低減が重要であることが示されている。

そこで本研究では、セメント系材料をアンカー材の接着剤として用いた場合の、材料特性と付着強度の関係について、検討を行っている。

1. 4. 2 アンカーの長期持続荷重に関する研究

アンカーの長期持続荷重に対する研究は、欧米においては、ビッグディグの天井板事故以降、日本においては笹子トンネルの天井板崩落事故以降に急増した。しかしながら、試験に多大な時間がかかるため、あと施工アンカーの長期持続荷重に対する研究例は少なく、試験方法、評価方法も統一されていない。

長期持続荷重に関する研究において、コンクリートや金属、プラスチックの単体材料のクリープ評価は、数多く行われており、多くの報告、書籍も出版されている。

ここでは、あと施工アンカーのクリープに関する研究とコンクリートのクリープに関する研究について、本研究に関連する研究を以下に記載する。

(1) あと施工アンカー既往の研究における知見

松崎ら[1-24]は、「ポリエステル系樹脂アンカーの長期持続引張荷重による限界耐力（常温および65℃の場合）」の中で、常温（気温）と65℃において、M20のボルトを用いて、載荷荷重比0.45～0.9の範囲において、クリープ破壊試験を行い、以下の結果を得ている。

- ・樹脂系アンカーの65℃における静的引張耐力は、常温の耐力の約40%まで低下することがある。
- ・常温における荷重比（Ls/Pt）と破壊までの載荷期間の間に下記の関係式が得られた。

$$Ls/Pt = -0.11 \log T + 0.74$$

- ・65℃引張クリープ実験では、載荷荷重比0.45～0.9の範囲において1日以内にボルトの引き抜けを起こしている。

中野ら[1-25]は、「あと施工アンカーの長期許容応力度に関する研究 その3 引張クリープ実験」において、カウンターウエイト方式(図 1-4-6)とバネ方式(図 1-4-7)のクリープ試験装置を製作し、D13, D19のアンカー筋を用いて、埋込み長さ5 da, 7 da, 15 daでエポキシアクリレート系樹脂アンカーと先付けアンカーを比較している。

- ・エポキシアクリレート系樹脂アンカーのクリープ変形量は、同一条件の先付けアンカーとほぼ等しい。
- ・コンクリート強度が高いほどクリープ変形量は小さく、定着長による顕著な差は認められない。
- ・カウンター方式およびバネ方式の両載荷方式の違いによる性状の違いは認められない。

井口ら[1-26]は、「接着系あと施工アンカーの長期持続特性に関する実験的検討」において、アンカー材としてエポキシ樹脂とエポキシアクリレート樹脂を用いてクリープ試験を行っている。アンカー筋として M12 の全ネジボルトを、埋込み長さを $5d_a$ として、カウンターウェイト方式のクリープ試験装置により載荷荷重比 55% で試験を行い、反力板内径を 25mm と 150mm の 2 種類を用いて長期持続荷重特性を検討し、以下の結果を得ている。

- ・ 抜け出し量の時間推移は、累乗近似と相関がよい(図 1-4-8)。
- ・ 90 日載荷時の抜け出し量は、引張試験における最大荷重の抜け出し量の 53~84% であり、載荷荷重比 55% における抜け出し量は非常に大きい(図 1-4-9)。
- ・ 長期持続荷重 90 日載荷後に実施した引張試験では、持続載荷を行った試験体は、長期持続載荷を行っていない試験体の引張強度を上回る(図 1-4-10)。

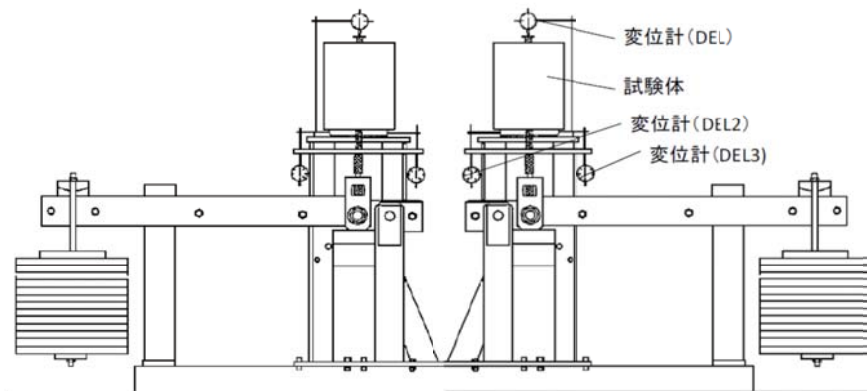


図 1-4-6 カウンターウェイト方式 クリープ試験装置[1-23]

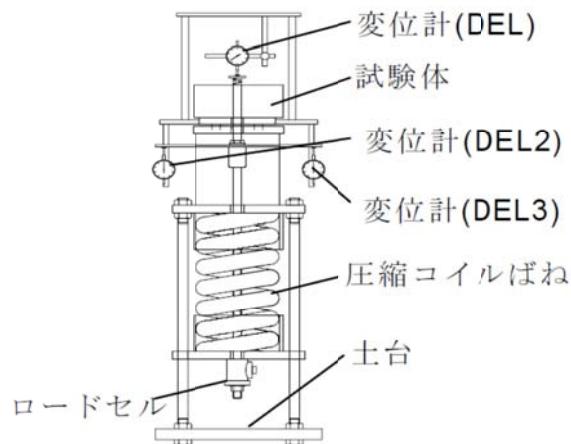


図 1-4-7 バネ方式 クリープ試験装置[1-25]

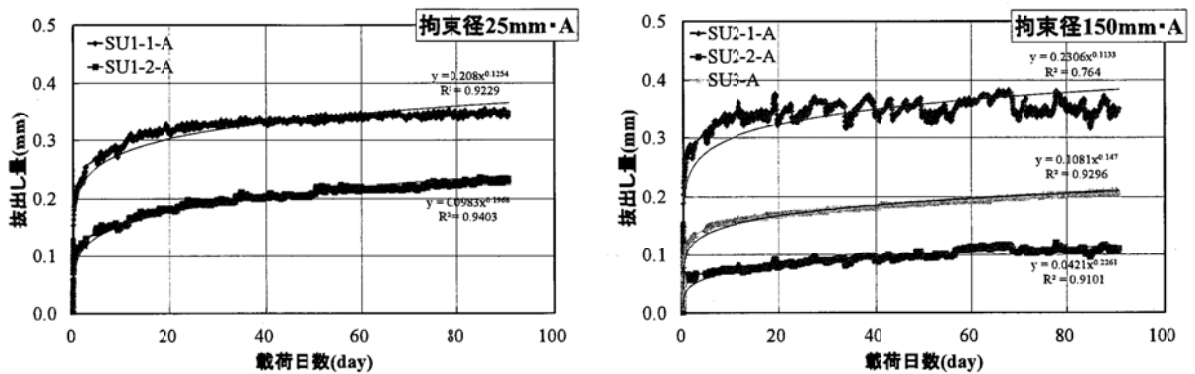


図 1-4-8 抜け出し量推移[1-26]

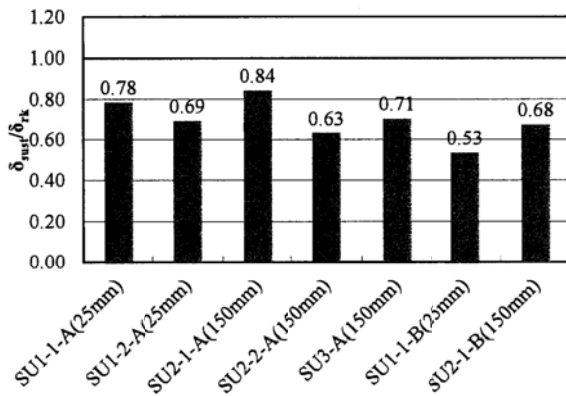


図 1-4-9 90 日載荷時の抜け出し量[1-26]

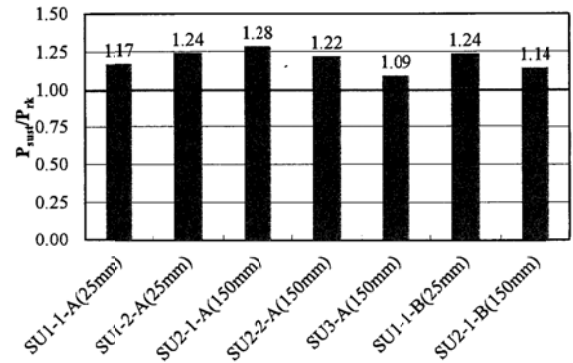


図 1-4-10 長期持続載荷後の最大荷重[1-26]

(2) コンクリートのクリープに関する知見

コンクリートのクリープの研究の歴史は深く、長期にわたって、多くの研究者によって種々の面からクリープの検討が行われている。ここでは、一般的なクリープ挙動とクリープメカニズムについて提案されている説について述べる。

コンクリートのクリープひずみ ϵ_c は、一定応力下における供試体の全変形ひずみ ϵ_t から時間 t_0 において力が作用したときに生じる弾性変形 ϵ_i と載荷供試体と同じ環境下におかれた時間 t_0 から供試体の変形（収縮 ϵ_s ）を差し引いたものであり、次式のように表される。

$$\epsilon_c = \epsilon_t - \epsilon_i - \epsilon_s$$

図 1-4-11 に、クリープひずみと回復性クリープと非回復性クリープの模式図[1-27]を示す。回復性クリープは遅れ弾性と呼ばれ、載荷の時に同じ大きさのものが生じている

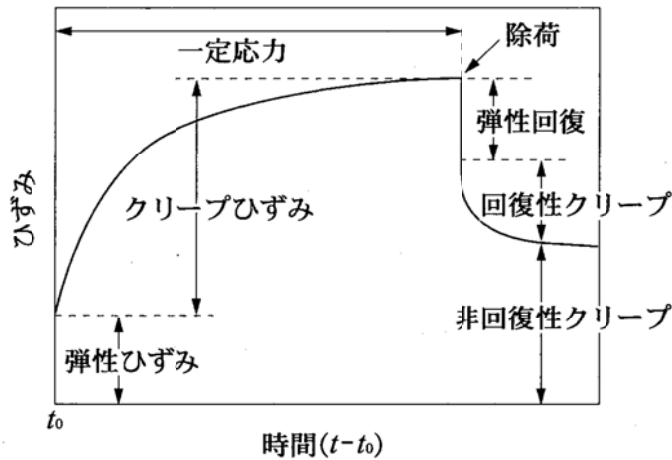


図 1-4-11 回復および非回復クリープひずみ[1-27]

と考えられる。除荷後の全クリープひずみから回復性成分を差し引いたひずみを非回復性クリープひずみと呼んでいる。

コンクリートの圧縮強度の 0.4~0.5 程度までの応力範囲でクリープひずみは、与えられた応力に比例し、クリープひずみは次式で表される。

$$\varepsilon_c(t) = \sigma J(t, t_0)$$

ここで、 $J(t, t_0)$ は比クリープと呼ばれ、単位応力あたりのクリープひずみである。比クリープは $(t - t_0)$ の関数であり、関数の形は載荷材齢によって異なったものになる。

クリープのメカニズムを現象論的に説明する理論は数多く提案されている。一つの理論で現象すべてを説明できるものはないのが現状であるが、以下に提案されている4つのメカニズムを示す[1-28]。

①シーページ説

硬化体中のセメント硬化体表面に存在するゲル水が、コンクリートに載荷された持続荷重によって圧出されたり、外気との湿度勾配によって蒸発したりすることにより、収縮し体積変化を起こす。

②遅延弾性説

コンクリートのクリープを遅延弾性現象で説明するもので、骨材とセメント硬化体が固体骨組みに相当し、ゲル水あるいはキャピラリー水が粘性相になる。

③クラックの発生に起因する変形説

持続荷重下においては、硬化したセメントペースト内の粒子内、粒子間あるいはセメントペーストと骨材間の付着の局所的な破壊がおこると考えられる。この局部破壊に

起因する変形が非回復性クリープとする説である。

④結晶のすべり，塑性変形説

セメントのゲル粒子相間，あるいは骨材とセメントペースト間のすべりによりクリープが起こるとする説である。

コンクリートにおけるクリープの基本特性について，土木学会のコンクリート標準示方書[1-29]では，クリープの予測式は，単位応力当たりのクリープひずみ，すなわち比クリープひずみで与えている。クリープを基本および乾燥成分にわけ，それぞれの最終値を主要な要因を考慮して予測し，併せて有効時間曲線によってその進行度を予測している。

$$\dot{\epsilon}_{cc}(t, \hat{t})/\sigma_{cp} = \frac{4W \left(1 - \frac{RH}{100}\right) + 350}{12 + \hat{f}_c(\hat{t})} \cdot \log_e(t - \hat{t} + 1)$$

ここに，

$\dot{\epsilon}_{cc}(t, \hat{t})/\sigma_{cp}$: 材齢 t' (日) に初載荷を行ったコンクリートの材齢 t (日) における単位応力当たりのひずみ ($\times 10^{-6}/(\text{N}/\text{mm}^2)$)

W : 単位水量 (kg/m^3) ($130\text{kg}/\text{m}^3 \leq W \leq 230\text{kg}/\text{m}^3$)

RH : 相対湿度 (%)

\hat{t}, t : 載荷時および載荷中のコンクリートの有効材齢 (日) である

また，クリープを設計に考慮するためによく用いられる基本的な仮定として次のものがある[1-30]。

①Davis-Glanville の法則

クリープに関するフックの法則で，クリープひずみは持続応力の大きさに比例し，圧縮に対しても引張に対しても比例定数は等しい。

②Whitney の法則

同一コンクリートでは，単位応力に対するクリープの進行は一定不変である。

(3) 既往の研究の課題

既往のあと施工アンカーのクリープに関する研究では，主に有機系材料について研究が行われており，無機系アンカーに対する報告例は，非常に少ない。

また，クリープ破壊線図からのクリープ破壊時間の推定や，クリープ曲線からの長期におけるクリープ変形量の推定が行われている。しかし，日本において，欧米の規格である ACI や EOTA での評価方法を参考に評価を行っており[1-8][1-9]，材料特性を考慮したクリープ評価方法の検討は，行われていない。

そこで、本研究では、無機系注入式あと施工アンカーを中心に、あと施工アンカーのクリープ試験方法、評価方法の検討を行っている。

1.5 研究の範囲

本研究は、無機系注入式あと施工アンカーに関し、無機系アンカーとしての付着性能、長期耐久性能について、標準環境下における健全なコンクリートを対象として、実験的に検討したものである。カプセル式アンカー、ひび割れコンクリートおよび温度条件等の環境条件の影響を含むものについては、研究の範囲外とした。また、耐久性能についても長期載荷荷重に対するものだけを検討の対象とした。

1.6 論文の構成

本研究は5章から構成されており、論文の構成を図 1-5-1 に示す。

第1章【序論】では、研究の背景、本研究の目的、本研究に関連する既往の研究、研究の範囲、論文の構成について述べた。

第2章【無機系注入式あと施工アンカーの付着メカニズム】では、アンカー材の材料配合を変化させて、膨張材の影響、乾燥収縮率の影響、保水性能の影響を確認し、付着力と材料特性の関係を調べた。その結果、乾燥収縮率と付着力には相関は認められず、保水性能が付着強度へ及ぼす影響が高いことを確認した。無機系アンカーではコンクリート界面とアンカー材との界面で発生するアンカー材のドライアウトにより付着力が低下するため、無機系アンカー材の性能として高い保水能力が必要であることを示し、無機系注入式アンカーの付着モデル、品質基準の提案を行った。

第3章【超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの開発】では、無機系注入式あと施工アンカーで主流となっている保水性能の高い超速硬セメント系注入式アンカーについて、基本平均付着強度、付着強度のばらつき等の試験を行い、付着力の検証を行った。その結果、施工方向に関わらず、付着強度の変動係数が5%程度であり、付着強度のばらつきが少なく安定した品質が得られることを確認した。

第4章【超速硬セメント系注入式アンカーの長期持続荷重に関する検討】では、ばね式クリープ試験装置を製作し、コンクリート強度、鉄筋径等の影響を確認した。改良した試験装置によるクリープ挙動の測定結果では、試験体毎の変位にばらつきが少ないことを確認し、クリープ試験方法を提案した。

あと施工アンカーのクリープ挙動に及ぼす母材コンクリート、鉄筋径、拘束方法の影響を確認し、先付けアンカー、有機系注入式あと施工アンカーと超速硬セメント系注入式アンカーのクリープ挙動の比較検討を行い、欧米で行われているクリープ評価方法の検証を行った。有機系材料と無機系材料では材料特性が大きく異なるため、クリープ挙動にも違いが認められ、無機系注入式あと施工アンカーへは、欧米で行われているクリープ評価方

法の適用が困難であることが判明した。そこで、新たにあと施工アンカーに対するクリープ評価方法の提案を行った。

第5章【結論】では、本研究で得られた結論を取りまとめた。

本研究により、これまで提示されていなかった無機系注入式あと施工アンカーの付着メカニズムを明示し、あと施工アンカーの長期持続荷重下における各種要因がクリープ変形量に与える影響を把握し、あと施工アンカーのクリープ評価方法を新たに提示した。

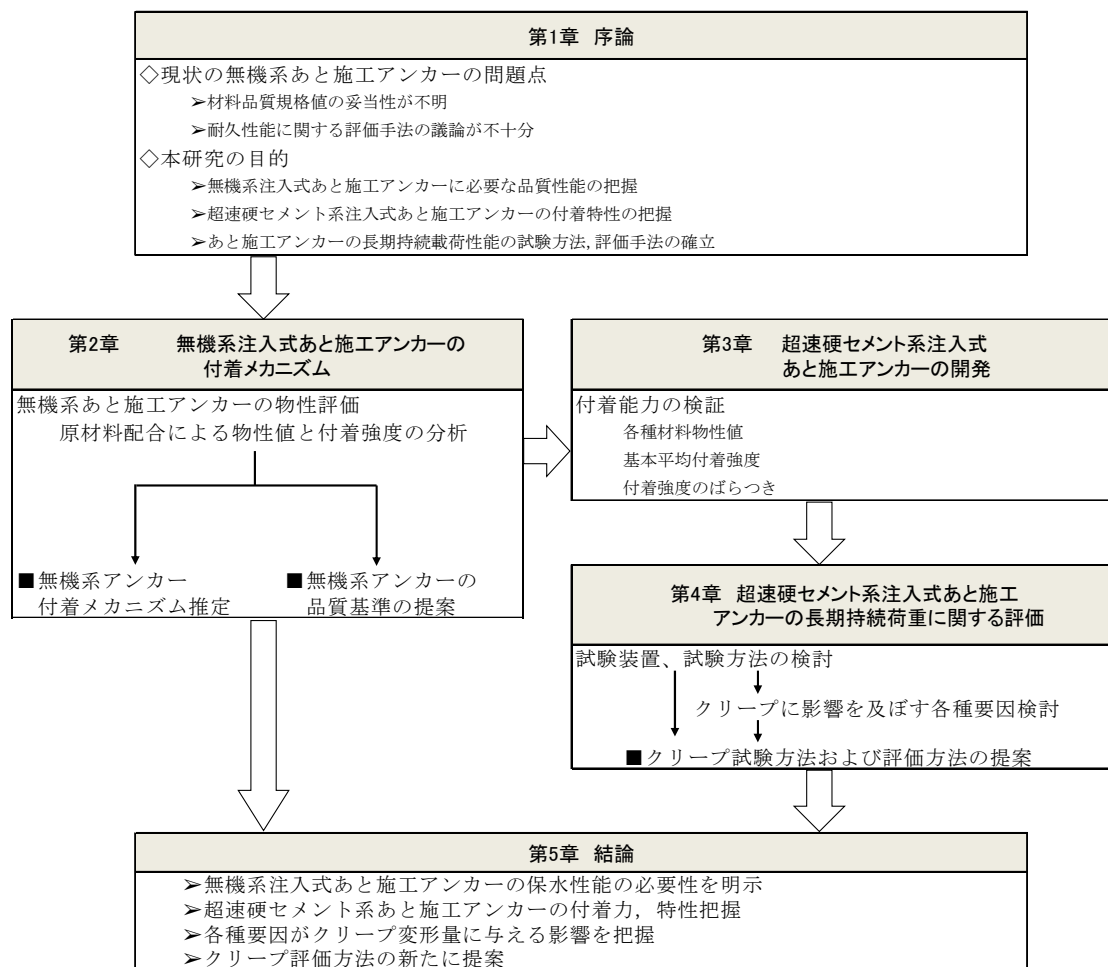


図 1-5-1 論文の構成

第 1 章の参考文献

- [1-1] National Transportation Safety Board (2006). *Highway accident report: ceiling collapse in the Interstate 90 Connector Tunnel, Boston, Massachusetts, USA, July 10, 2006.*
- [1-2] 調査・検討委員会トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会，トンネル天井板の落下事故に関する報告書，2013.6.18
- [1-3] あと施工アンカーの耐久性評価と設計方法の高度化に関するシンポジウム， p.66， 2016.06.27
- [1-4] 公益社団法人：道路橋支承便覧（改訂版）平成16年度版 pp.236-241
- [1-5] 深谷泰文・露木尚光：セメント・コンクリート材料科学，技術書院 p.10（2003）
- [1-6] あと施工アンカーの耐久性評価と設計方法の高度化に関するシンポジウム， p.68， 2016.06.27
- [1-7] JR東日本 土木工事標準仕様書，平成27年10月
- [1-8] American Concrete Institute：ACI355.4-11 Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete, Aug.2011
- [1-9] European Organization for Technical Approval：ETAG 001 GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL OF METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE Part 5 BONDED ANCHORS, Feb.2013
- [1-10] 日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー・品質基準（金属系・接着系），平成13年12月改訂
- [1-11] 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，2010改訂版
- [1-12] ボンド接着読本，コニシ株式会社，2011年12月版
- [1-13] 高田忠彦：接着の科学，
入手先< <http://home.hiroshima-u.ac.jp/masters/TSS-gakumon-sanpo/24-8-takada.pdf>>
- [1-14] 浜田公也，河村博之，立石妙子：穿孔セメントモルタル充填式あと施工アンカーボルトの応力と耐力について（その1 穿孔径と深さと底面付着を変化させた引張実験），日本建築学会講演梗概集，C，pp.139-140，1988.10
- [1-15] 小原孝之，山本晴人，斎藤修一，松島学，大浦篤：アンカー孔壁面を目荒し処理した無収縮モルタル接着系あと施工アンカーの付着強度に関する実験的検討，土木学会第55回年次学術講演会，V-570，pp.1142-1143，2000.9
- [1-16] 村山聡，古田光博，角谷治克，丸山喜照：無機系あと施工アンカーの基礎的性状—その1 無機材料の圧縮強度確認方法—，日本建築学会講演梗概集，C，pp.623-624，2011.8

- [1-17] 古田光博, 村山聡, 角谷治克, 丸山喜照: 無機系あと施工アンカーの基礎的性状—その2 引張試験およびせん断試験—, 日本建築学会講演梗概集, C, pp.625-626, 2011.8
- [1-18] 丸山喜照, 村山聡, 角谷治克, 古田光博: 無機系あと施工アンカーの基礎的性状—その3 引張せん断試験—, 日本建築学会講演梗概集, C, pp.626-627, 2011.8
- [1-19] ピーターH・エモンズ: イラストで見るコンクリート構造物の維持と補修, 鹿島出版, p.118, 1995
- [1-20] 山本高広, 若杉三紀夫, 大崎敬一: 再乳化型粉末樹脂を用いたポリマーセメントモルタルの付着性状(その2): セメント・コンクリート論文集, Vol.52, pp.400-405, 1998
- [1-21] 阿部宏, 丸山俊雄, 平井孝之: ポリマーセメント系接着剤によるモルタル塗り継ぎの接着性に関する研究: セメント・コンクリート論文集, Vol.52, pp.864-871, 1998
- [1-22] 榎原弘幸ほか: ポリマーセメントモルタルの接着強度に及ぼすコンクリート下地処理方法の影響: 材料, Vol.52, No.9, pp.1082-1088, 2003.9
- [1-23] 佐藤あゆみ, 石山智, 山田寛次: EPMA分析に基づくコンクリートの鉛直打継ぎの界面処理に関する考察: セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp.251-258, 2012
- [1-24] 松崎育弘, 阿部保彦, 宇佐見滋: ポリスチレン系樹脂アンカーの長期持続引張荷重による限界耐力(常温及び65°Cの場合), 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.249-252, 1981.3
- [1-25] 中野克彦ほか: あと施工アンカーの長期許容応力度に関する研究—その3 引張クリープ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造IV, pp.639-640, 2011.8
- [1-26] 井口重信, 大野貴信, 岩崎和明, 松田芳範: 接着系あと施工アンカーの長期特性荷重特性に関する実験的検討, 土木学会第70回年次学術講演会概要集, V-182, pp.363-364, 2015.9
- [1-27] 川村満輝, S・チャタジー: コンクリートの材料科学, 森北出版, 2002.9
- [1-28] Neville, A.M., et al, "Creep of plain and structural concrete", pp.158~166, Construction Press, 1983
- [1-29] (社)土木学会: 2012年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], pp.105-108, 2012
- [1-30] A.M.Neville: ネビルのコンクリートのバイブル, 技報堂, 2004.6

第2章

無機系注入式あと施工アンカーの付着メカニズム

2.1 概要

接着系あと施工アンカーでは、有機系あと施工アンカーが多く使用されている。しかし、耐久性の観点より、近年無機系あと施工アンカーの使用も増加しつつある。

無機系ガラス管タイプのカプセル式アンカーでは、主成分にポルトランドセメントを、硬化剤として水ガラスを使用するものや、主成分に酸化マグネシウムを、硬化剤としてリン酸二水素アンモニウムを用いるものがある。また、紙チューブタイプのカプセル式アンカーは、紙チューブの中にセメント系材料を充填し、これを水に浸漬し吸水させて用いている。

ガラス管タイプでは、孔内でカプセルを破壊し材料を攪拌させるため、施工者により攪拌時間等が異なり、アンカー筋の付着強度のばらつきが生じやすい。紙チューブ式では、カプセルへの吸水量が一定にならないため、水セメント比がばらつき、これにより付着強度にばらつきが生じる。

一方、注入式アンカーでは、カートリッジ内の粉体に規定量の混練水を注入し攪拌して使用するため、水セメント比が一定であり、注入する材料品質は均一となる。また、注入量を自由に変化させることができるため、埋込み長さの大きいものに対しても適用可能であり、自由度が高い。このため、無機系注入式あと施工アンカーの使用用途が、広がっていくものと推測される。

無機系アンカー材の試験項目・規格について、「各種合成構造設計指針・同解説」[2-1]では、圧縮強度が記されている。また、日本建築あと施工アンカーの「あと施工アンカー・品質基準（金属系・接着系）」[2-2]では、無機系アンカー材料の規格値は圧縮強度と曲げ強度を規定している。しかしこれらの規格の明確な根拠となるデータが示されていない。

そのため、無機系注入式あと施工アンカーの試験データに基づいた試験項目・規格を設定する必要がある。

無機系注入式あと施工アンカーは、材料の配合により、アンカーの付着性能は大きく異なることが推測される。セメントの種類によるモルタル板への接着強さは、超速硬セメントを使用した場合、普通ポルトランドセメントを使用した場合と比較して、施工厚さが小さくなることによる接着強度の低下量は小さいことが報告されている[2-3]。無機系注入式あと施工アンカーにおいてもモルタル板への接着と同様の接着機構により、普通セメントを用いたアンカー材の方が超速硬セメントを使用したものよりアンカーの付着強度は低くなるものと推測される。

現在、無機系注入式あと施工アンカーでは、超速硬セメントを使用したものが多く使用されているが、本章では、アンカー材として付着強度が低いと想定される普通ポルトランドセメントを基礎材料として使用し、アンカー材の物性と付着強度の関係性を調べ、無機系材料の付着に関する基礎物性の評価を行った。

2.2 無機系アンカー材の物性とアンカーの付着に関する検討

2.2.1 目的

無機系注入式あと施工アンカーの材料物性値がアンカー筋の引抜き付着強度に与える影響は、これまでに報告された例はない。しかし、無機系注入式あと施工アンカーを安全に使用する上で、アンカー材に必要な物性値を把握することは必要である。

アンカー筋の引抜き付着強度に与える要因として、アンカー材料自体の強度や孔内での材料の膨張収縮、躯体コンクリートとの接着性の影響が考えられる。コンクリート構造物の断面修復材では、躯体コンクリートとの接着において材料の保水能力がコンクリートとの付着力に影響を与える[2-4]と考えられている。

無機系アンカー材料の原材料となるセメントの種類によるモルタル板への接着強さは、超速硬セメントを使用した場合、普通ポルトランドセメントを使用した場合より、施工厚さが小さくなることによる接着強度の低下量が小さいと報告されている[2-3]。アンカーの付着性能においても普通ポルトランドセメントを主成分とした場合の付着性能は、超速硬セメントを使用したものより低いものと推測される。

そこで、普通ポルトランドセメントを基礎材料として、圧縮強度、膨張収縮、保水性能がアンカー筋の引抜き強度に与える影響について検討を行った。

2.2.2 実験概要

試験は以下の4シリーズに分けて行った。

シリーズⅠ・水セメント比・圧縮強度の影響

シリーズⅡ 膨張材添加の影響

シリーズⅢ・長さ変化率の影響

シリーズⅣ・保水係数の影響

(1) 使用材料および配合

検討に用いたアンカー材の配合を表 2-2-1 に示す。

シリーズⅠおよびⅡで使用したセメントは、普通ポルトランドセメント(NC)を使用し、膨張材はエトリンナイト系膨張材を使用した。また、細骨材は、乾燥砂の6号珪砂を使用した。

シリーズⅢにおいては、セメントは普通ポルトランドセメント(NC)および超速硬セメント(URHC)を用い、長さ変化率を調整するために、アルキレンオキシド系収縮低減剤を使用した。

シリーズⅣでは、セメントには、普通ポルトランドセメントおよび超速硬セメントを用い、保水性能を調整するために、メチルセルローズ系増粘剤を使用した。

シリーズⅠの水セメント比は35、40、45%とし、その他のシリーズの水セメント比を35%一定とした。検討に用いたコンクリートの強度は、約45N/mm²を用い、母材コンクリートの寸法は、800×1700×400mmとした。なお、試験に用いた母材コンクリートへのアン

表 2-2-1 アンカー材配合

| | | 水セメント (結合材) 比(%) | 単体量配合 (kg/m ³) | | | | | | |
|-------|--------|------------------------|----------------------------|--------------|----------------|-----|---------------|-------|-----|
| | | | 水 | セメント (NC) | セメント (URHC) | 膨張材 | 細骨材 (6号珪砂) | 収縮低減剤 | 増粘剤 |
| NC系 | NC-1 | 35 | 328 | 936 | - | - | 936 | - | - |
| | NC-2 | 40 | 358 | 896 | - | - | 896 | - | - |
| | NC-3 | 45 | 386 | 857 | - | - | 857 | - | - |
| | NC-4 | 35 | 328 | 843 | - | 94 | 936 | - | - |
| | NC-5 | 35 | 328 | 749 | - | 187 | 936 | - | - |
| | NC-6 | 35 | 328 | 936 | - | - | 936 | 0 | - |
| | NC-7 | 35 | 326 | 932 | - | - | 932 | 9 | - |
| | NC-8 | 35 | 325 | 928 | - | - | 928 | 19 | - |
| | NC-9 | 35 | 322 | 921 | - | - | 921 | 37 | - |
| | NC-10 | 35 | 328 | 936 | - | - | 936 | - | 0 |
| | NC-11 | 35 | 327 | 936 | - | - | 936 | - | 1 |
| | NC-12 | 35 | 327 | 935 | - | - | 935 | - | 2 |
| | NC-13 | 35 | 327 | 935 | - | - | 935 | - | 3 |
| URHC系 | URHC-1 | 35 | 327 | - | 938 | - | 935 | 0 | - |
| | URHC-2 | 35 | 326 | - | 934 | - | 931 | 9 | - |
| | URHC-3 | 35 | 324 | - | 930 | - | 927 | 19 | - |
| | URHC-4 | 35 | 322 | - | 922 | - | 919 | 37 | - |
| | URHC-5 | 35 | 327 | - | 938 | - | 935 | - | 0 |
| | URHC-6 | 35 | 327 | - | 937 | - | 934 | - | 3 |

収縮低減剤：アルキレンオキッド系

増粘剤：セルロース系

カー筋の施工は、コンクリート打設後3か月以上経過後に行った。

アンカー筋として用いた鉄筋は、D13の高強度鉄筋（種類：MK785）を用いた。アンカー筋の先端形状は、寸切りとした。

検討に用いたアンカー材の圧縮強度の測定は、φ50×100mmの円柱供試体を使用しJIS A 1108[2-5]、JIS A 1149[2-6]に準拠した。養生は、付着強度試験体と同一条件とし、測定は、付着強度試験と同時に行った。

長さ変化率の測定は、「JIS A 1129-3 モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法—第3部：ダイヤルゲージ方法」[2-7]に準じて、温度20℃における長さ変化を測定した。20℃の恒温室内において、材料を40×40×160mmに成形し、24時間後に脱型後、直ちに基長の測定を行い、温度20℃ 60%R.H.において養生を行い、所定材齢毎に測定を行った。

材料のフレッシュ状態における材料の水分保持の性質を調べるため、「JIS A6916-2014

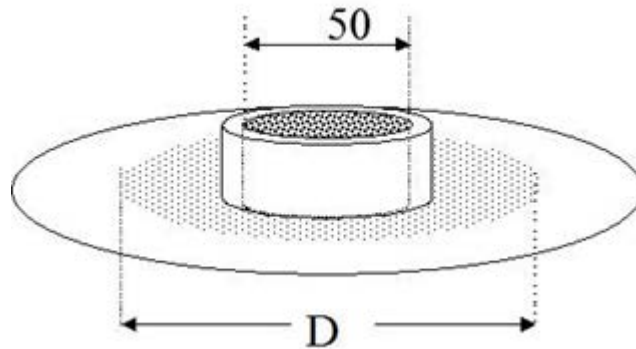


図 2-2-1 保水試験方法

（建築用下地調整材 付属書（A））の「タイル張付け用モルタルの試験方法」[2-8]に準じて、アンカー材の保水試験を行った。保水試験は、 $200 \times 200 \times 5$ mmのガラス板上にJIS P3801（ろ紙(化学分析用)）に規定する直径185mmのろ紙を載せ、その中心部に内径50mm高さ10mmのリング型枠を設置した。リング型枠内に試料を詰め、へらで盛り上がり部分をかきとり、ガラス板をその上から載せて試料をはさみ、上下を逆にして静置した。60分後に、ろ紙に滲み出した水分の長径及び短径をノギスで測定し、その平均値 L_{60} (mm)を求め、式(2-1)によって保水率を算出した(図2-2-1)。

$$R_w = \frac{L_r}{L_{60}} \times 100 \quad \text{式 (2-1)}$$

ここに、 R_w ：保水率 (%)

L_{60} ：60分後の水分の広がり (mm)

L_r ：リング型枠の内径 (mm)

(2) アンカー筋の定着

コンクリート試験体は、湿式コアドリルを用いて $\phi 18$ mm に穿孔し、アンカー筋の埋込み長さは $7d_a$ とした。アンカーの定着は、シリーズ I ~ III において穿孔翌日に行い、シリーズ IV では、穿孔後 14 日間孔内を乾燥させた後に、アンカー筋の定着を行った。

アンカー材の練混ぜは「JIS R 5201 の 8.1(2)（機械練り用練り混ぜ機）」[2-9]に規定する練り混ぜ用機械器具を使用し、3 分間練り混ぜた後に穿孔した孔に材料を充填した。アンカー材を孔に充填した後すぐにアンカー筋を挿入し、アンカー筋を固着させた。その後、材齢 14 日まで室内で養生を行った。

(3) アンカー筋の付着強度試験

養生終了後、図2-2-2に示す試験装置を用いて、アンカー筋の引抜き付着強度試験を行った。破壊モードを付着破壊とさせるために反力板（厚さ22mm，孔径26mm）を用いた。加

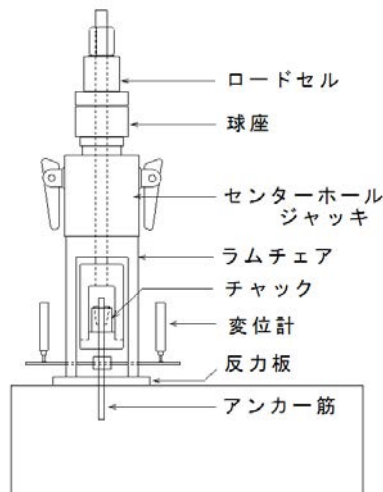


図 2-2-2 付着試験装置

力は、反力板の上にラムチェア、センターホールジャッキおよび球座を設置し、センターホールジャッキにより試験体に引張力を導入した。測定項目は荷重およびアンカー筋の拔出量とした。

アンカー筋の付着強度は、式 (2-2) により、算出した。

$$\tau_b = \frac{P_{\max}}{\pi \cdot d_a \cdot l_b} \quad \text{式 (2-2)}$$

ここで、 τ_b はアンカー筋の付着強度 (N/mm^2)、 P_{\max} は最大耐力 (kN)、 d_a はアンカー筋の公称径 (mm)、 l_b はアンカー筋の埋込み長さ (mm) である。なお、アンカー筋の付着強度の算出に用いたアンカー筋の埋込み長さは、アンカー筋の全長から、埋込まれていないアンカー筋の長さを差し引いた値を用いた。

2. 2. 3 実験結果

表 2-2-2 に全シリーズの試験数 5 本の平均値を示す。付着強度は $7.1 \sim 21.1 \text{N}/\text{mm}^2$ となり、配合により付着強度が大きく異なった。

(1) シリーズ I : 水セメント比・圧縮強度の影響

図 2-2-3 にアンカー材の圧縮強度と付着強度の関係を示す。水セメント比のみを変化させた場合、水セメント比が大きくなるほど、アンカー材の圧縮強度の低下にともない、付着強度は小さくなる傾向であった。

山本ら[2-3]はモルタル板を使用した接着試験において、施工厚さが小さくなるほど付着強度は小さくなり、超速硬セメントを使用した場合は、普通ポルトランドセメントに比べ、 $2 \sim 10 \text{mm}$ の施工厚さにおいて、施工厚さによる付着強度の低下量が小さいと報告している。今回の試験における母材コンクリートと鉄筋とのクリアランスは 2mm 程度で、注入材の厚さが 2mm 程度薄く、山本らの報告と同様の事象により、普通セメントより超速硬セメントを使用した方が付着強度は高くなるものと考えられる。

表 2-2-2 付着強度試験結果

| | | 母材 コンクリート 強度 (N/mm ²) | 穿孔からの アンカー施工 までの日数 (日) | 付着強度 | | アンカー材 圧縮強度 (N/mm ²) | 破壊箇所割合 | | 保水率 (%) | 長さ変化率 (28d) (×10 ⁻⁶) |
|-------|--------|--|---------------------------------|-----------------------------|-------------|---------------------------------------|------------------|--------------|------------|--|
| | | | | 平均値 (N/mm ²) | 変動係数 (%) | | コンクリート -アンカー材 | アンカー材 -鉄筋 | | |
| | | | | | | | | | | |
| NC系 | NC-1 | 46.2 | 1 | 13.7 | 21.1 | 62.7 | 50 | 50 | - | - |
| | NC-2 | | | 10.6 | 13.7 | 58.6 | 40 | 60 | - | - |
| | NC-3 | | | 7.1 | 4.5 | 49.5 | 30 | 70 | - | - |
| | NC-4 | | | 18.3 | 16.1 | 55.0 | 10 | 90 | - | - |
| | NC-5 | | | 17.6 | 18.1 | 18.5 | 30 | 70 | - | - |
| | NC-6 | 44.5 | 14 | 14.0 | 42.5 | 56.0 | 60 | 40 | - | -1040 |
| | NC-7 | | | 10.4 | 42.5 | 48.1 | 70 | 30 | - | -710 |
| | NC-8 | | | 8.4 | 22.2 | 50.1 | 80 | 20 | - | -610 |
| | NC-9 | | | 8.8 | 15.5 | 47.7 | 80 | 20 | - | -470 |
| | NC-10 | | | 8.1 | 44.9 | 62.6 | 70 | 30 | 35 | - |
| | NC-11 | | | 10.5 | 37.2 | 54.2 | 60 | 40 | 63 | - |
| | NC-12 | | | 16.0 | 18.3 | 54.3 | 40 | 60 | 83 | - |
| | NC-13 | | | 19.5 | 3.9 | 49.9 | 20 | 80 | 91 | - |
| URHC系 | URHC-1 | 1 | 1 | 20.4 | 4.7 | 44.2 | 0 | 100 | - | -860 |
| | URHC-2 | | | 21.1 | 4.0 | 47.5 | 0 | 100 | - | -500 |
| | URHC-3 | | | 20.3 | 9.2 | 45.6 | 0 | 100 | - | -490 |
| | URHC-4 | | | 20.1 | 7.0 | 42.9 | 0 | 100 | - | -470 |
| | URHC-5 | 14 | 14 | 10.9 | 37.4 | 47.1 | 50 | 50 | 41 | - |
| | URHC-6 | | | 19.7 | 4.8 | 40.2 | 0 | 100 | 85 | - |

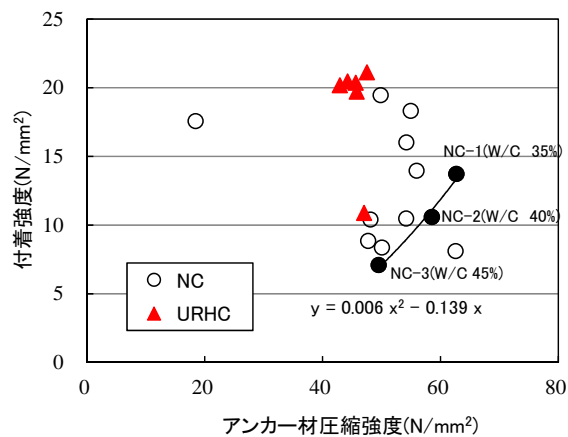


図 2-2-3 アンカー材圧縮強度と付着強度

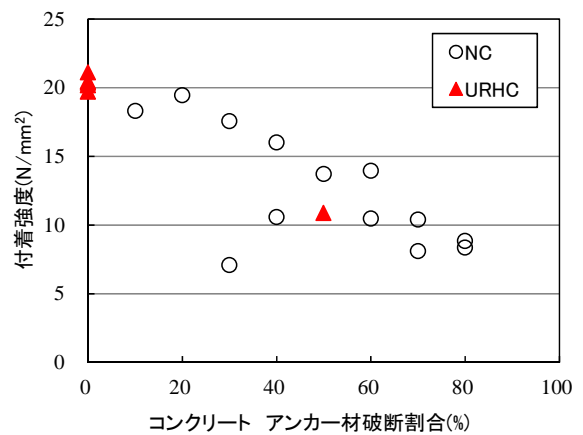


図 2-2-4 破断箇所と付着強度の関係

水セメント比の影響を比較した場合は、アンカー材の圧縮強度と付着強度に関係が認められたが、全試験におけるアンカー材の圧縮強度と付着強度には相関が認められなかった。これは、材料強度以外の要因が、付着強度に大きく寄与しているためと考えられる。

破断箇所と付着強度の関係を図 2-2-4 に示す。コンクリートとアンカー材の界面で破断する割合が大きいものほど、付着強度が低い傾向となり、無機系注入式あと施工アンカーでは、コンクリートとアンカー材の界面付着力が最大耐力に大きな影響を及ぼすことが判明し、付着強度が低強度領域（ 20N/mm^2 以下）において破断箇所の割合により付着強度が決定するものと推測された。アンカー筋の接着部分の破断状況を写真 2-2-1 に示す。

(2) シリーズⅡ：膨張材の影響

図 2-2-5 に膨張材と付着強度の関係を示す。今回使用した膨張材の添加量範囲は、セメント内割で 10～20%であり、試験では、膨張材としてコンクリートに添加される使用量

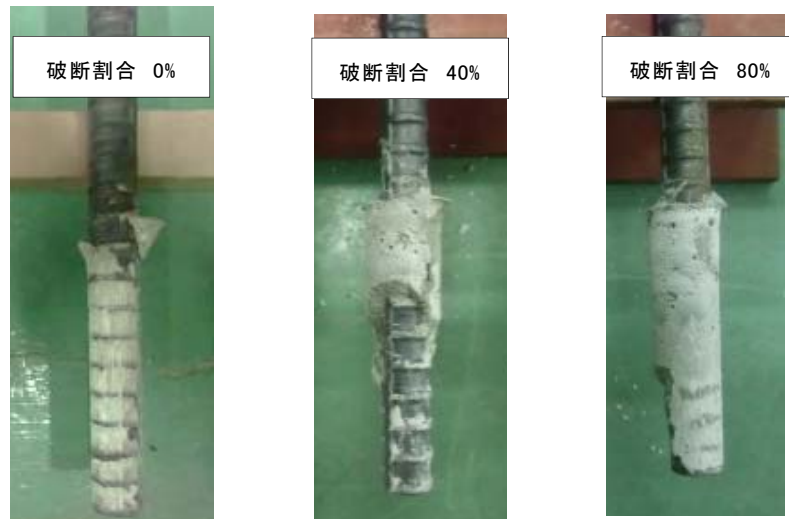


写真 2-2-1 アンカー筋の接着部分の破壊状況

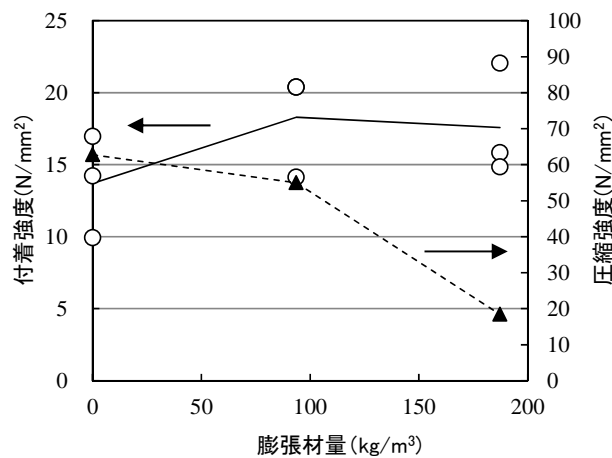


図 2-2-5 膨張材量と付着強度, 圧縮強度

以上のものまで検討した。

膨張材の添加量が 100kg/m^3 程度では、膨張材の添加により付着強度が上昇することが確認された。それ以上の膨張材を添加させた場合は、付着強度の増進はなく、圧縮強度はアンカー材料自身の過膨張により低下した。あと施工アンカーとしてセメント系材料を使用する場合には、母材コンクリートと鉄筋とのクリアランスが小さいため、実際の膨張量は非常に小さいと考えられる。アンカー材の膨張量が 1000μ と仮定すると 2mm 厚さで $2\mu\text{m}$ 程度の膨張量であり、このため、あと施工アンカーへの膨張材の添加が過剰であっても、アンカー材の膨張による母材コンクリートへ膨張ひび割れを発生させる可能性は非常に小さいものと推定される。

(3) シリーズⅢ:長さ変化率の影響

図 2-2-6 に長さ変化率と付着強度の関係を示した。アンカー材の長さ変化率の調整は、収縮低減剤の添加のみとし、空気量等の調整は行わなかった。

NC を使用したものでは、長さ変化率は $-1040\sim-470\mu$ の範囲における付着強度を調べた。収縮低減剤無添加の長さ変化率 -1040μ のものは、付着強度は大きくばらつき、収縮低減剤を添加することで、付着強度のばらつきは小さくなった。しかし、収縮率が $-1040\sim-470\mu$ の範囲においては、収縮率の低減による付着強度の向上は認められなかった。URHC を使用したシリーズにおける長さ変化率は $-860\sim-470\mu$ の範囲で、付着強度はすべてにおいて約 20N/mm^2 と高く、NC と同様に収缩量と付着強度の関係は認められなかった。

NC を使用したシリーズにおいては、収縮低減剤を添加することにより付着強度のばらつきは小さくなる傾向となった。付着強度のばらつきが小さくなった原因として、収縮低減剤には、界面活性作用があるため、収縮低減剤の添加によりコンクリートーアンカー材の界面での濡れ性が良好になったことにより、コンクリート界面での反応がより均一になり、ばらつきが小さくなったことが考えられる。

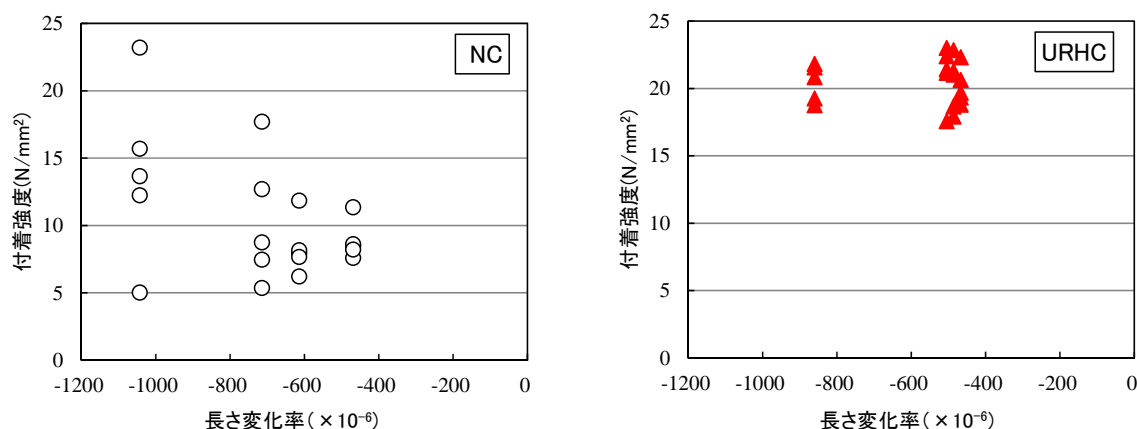


図 2-2-6 長さ変化率と付着強度

(4) シリーズⅣ：保水率の影響

図 2-2-7 に保水率と付着強度の関係を示す。NC および URHC を使用したもののいずれも保水率が大きくなるほど、付着強度は大きくなる傾向となった。また、保水率の増加に伴い、破断箇所も変化した。破断箇所は、保水率が小さい場合、コンクリート-アンカー材界面が多くなっていたが、保水率が大きくなると、アンカー材-鉄筋界面での破断割合が増加した。すなわち、フレッシュ状態におけるアンカー材の水を保持する能力が高いものほど、付着強度は大きくなった。

母材コンクリート強度より求める基本平均付着強度[2-1]は 14.6N/mm^2

($\tau_{bavg}=10\sqrt{(\sigma_B/21)}$)であり、NC を使用したものでは、保水率が 80 以上で、URHC では 65% 以上で、この基本平均付着強度以上となった。

榊原ら[2-4]は、モルタルの接着試験において、透水量の多いコンクリートでは、モルタルからコンクリートへの水の移動が多く、打継界面でのモルタル中のセメントの水和が阻害されるドライアウト現象によって、コンクリート界面での接着破壊が増加し、付着強度が低下して、ばらつきが大きくなることを報告している。アンカー材についても打継モルタルと同様の現象が発生しているものと推測され、保水係数が高いものほど、コンクリートとアンカー材の界面での水の移動が少なくコンクリート界面付近でのアンカー材の強度の低下は小さく、付着強度が高くなることが推測される。

NC-10 と NC-12 の配合について、ドライアウトの状況を確認するため、コンクリート-アンカー材界面に樹脂を注入し、界面部の空隙、脆弱層を確認した。コンクリートは $\phi 100 \times 200$ の試験体を使用し、穿孔後 14 日間乾燥させた後にアンカー筋を定着させた。その試験体を切断し、アンカー材とコンクリート界面の空隙に蛍光顔料を含むひび割れ注入用の樹脂を含浸させ、樹脂が硬化した後、コンクリート表面を研磨し余分な樹脂を取り除いた。切断面を観察した結果を写真 2-2-2、2-2-3 に示す。

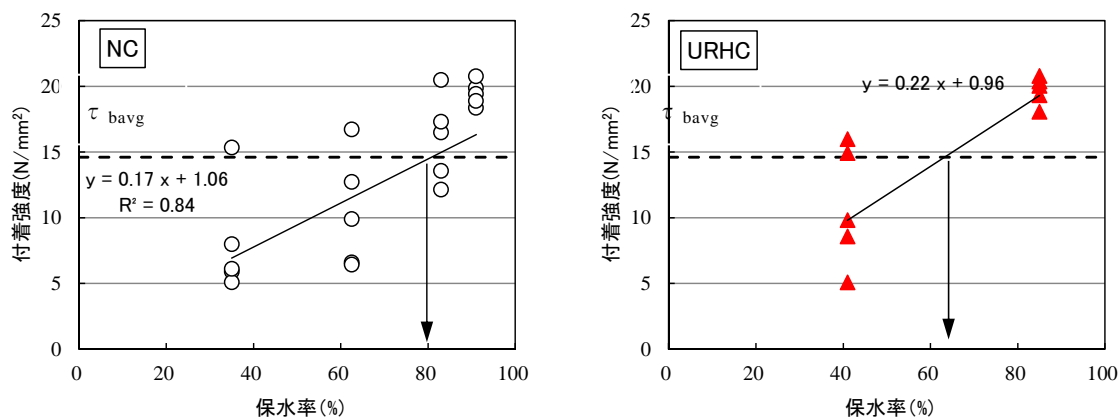


図 2-2-7 保水係数と付着強度

アンカー材として保水率が小さいNC-10を用いたものは、アンカー材とコンクリート界面で空隙多く認められる傾向であった。保水率の高いNC-12では、アンカー材全体に空隙が多く認められ、保水率が低いものではコンクリート界面で空隙または脆弱層が形成されやすいものと推測された。

これらの観察結果からも保水率が小さいものでは、ドライアウト現象の発生により、アンカー材とコンクリート界面部に脆弱部が形成されることが確認された。

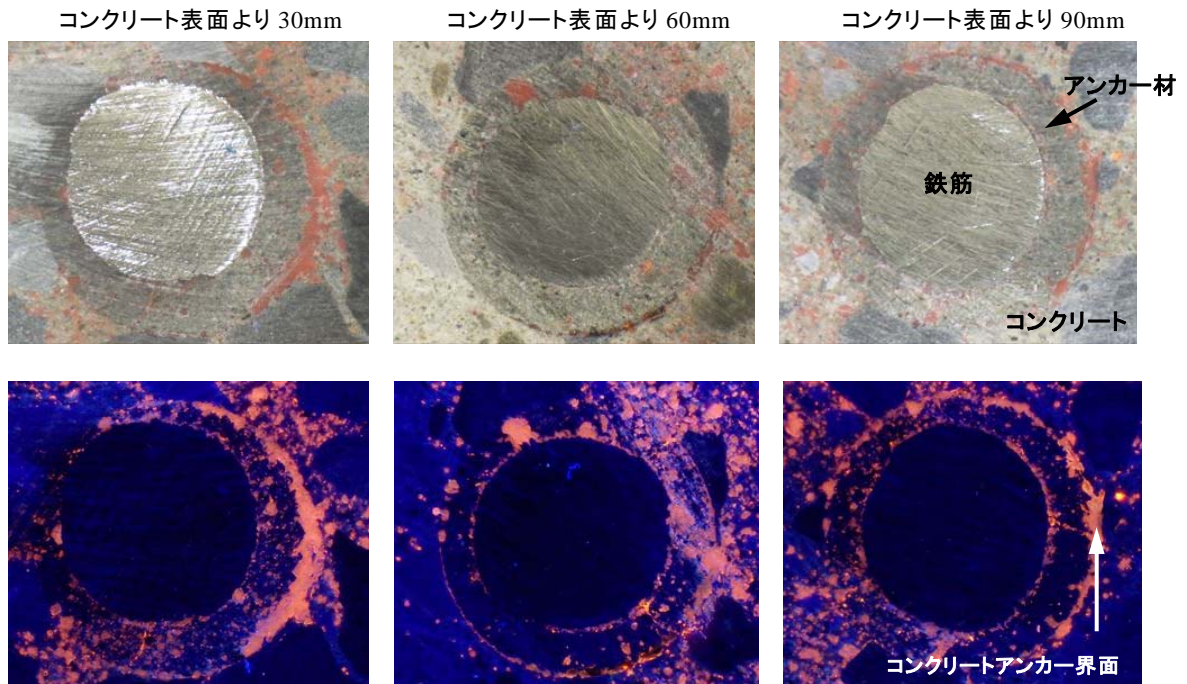


写真 2-2-2 アンカー材コンクリート界面 (NC-10 保水率 35%)

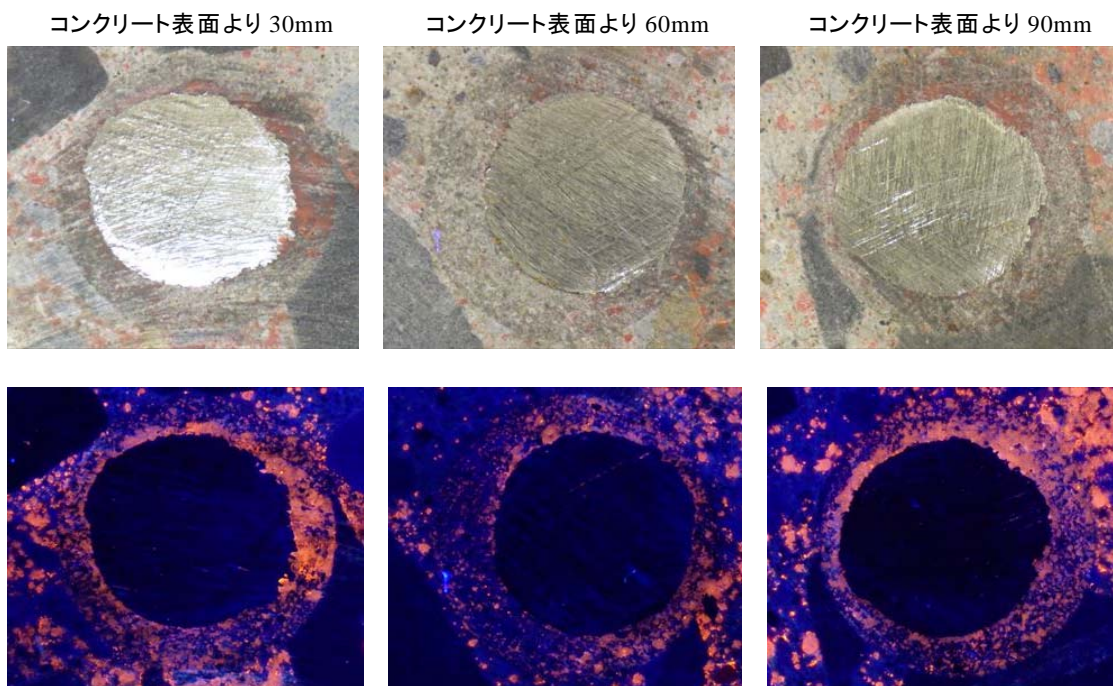


写真 2-2-3 アンカー材コンクリート界面 (NC-12 保水率 83%)

2.3 無機系あと施工アンカーの付着メカニズムの推定

ここでは、2章2節の結果より無機系注入式あと施工アンカーにおけるアンカーの付着メカニズムを推測した。

付着強度 $7.1\sim 21.1\text{N/mm}^2$ の範囲において、付着強度へは、保水性能、膨張性能が大きく影響をしており、圧縮強度、収縮率は大きな影響を及ぼさなかった。また、コンクリートとアンカー材の界面での付着強度に大きく影響されることが判明した。

これらのことから、無機系注入式あと施工アンカーにおいて、コンクリート-アンカー材界面において確実な付着強度が得られた場合には、アンカー筋とアンカー材界面での破壊となるため、アンカー材の圧縮強度の影響が表れてくるものと推測された。

また、収縮低減剤の添加により界面活性剤の影響によりコンクリート表面の濡れ性が大きく変化したことが考えられる。浜中らの研究[2-11]では、プライマーの表面張力による影響を検討しており、このことと関連しているものと推測される。

アンカー材の保水能力の向上にともない付着強度は向上しており、これは、榊原ら[2-3]が報告されているように、保水性能の向上によりアンカー材の水分がコンクリート側に吸水されるドライアウトの影響を緩和し、コンクリート-アンカー材界面でのセメントの水和反応が十分に進行したため、十分な付着強度が得られたものと推定される。

膨張材の影響については、アンカー材の膨張作用により、コンクリートとアンカー材界面での膨張力により接着状況が向上したことが考えられる。しかし、試験結果では、ばらつきが大きく、膨張量だけでは安定したコンクリート-アンカー材界面の付着強度は得られなかった。

これらの結果に基づき、図 2-3-1 にセメント系アンカーの付着発生のメカニズムを推定したモデル図を示す。

(A) : 保水能力の大きい材料

コンクリートの細孔部にセメント材料が入り込み、水分がコンクリート側へ奪われないため、セメントの水和が進行し、密なセメント水和結晶を生じる。接着機構は、力学的なかみ合わせと分子間力により接着力が生じる。

(B) : 保水能力の小さい材料

コンクリートの細孔部にセメント材料が入り込んでも、水分がコンクリート側へ奪われるため、セメントの水和が進行せず、粗な水和結晶となり、コンクリートとの界面部分に脆弱層を生じる。界面に生じる脆弱層により力学的なかみ合わせ部の材料強度が低く、分子間力も低くなる。

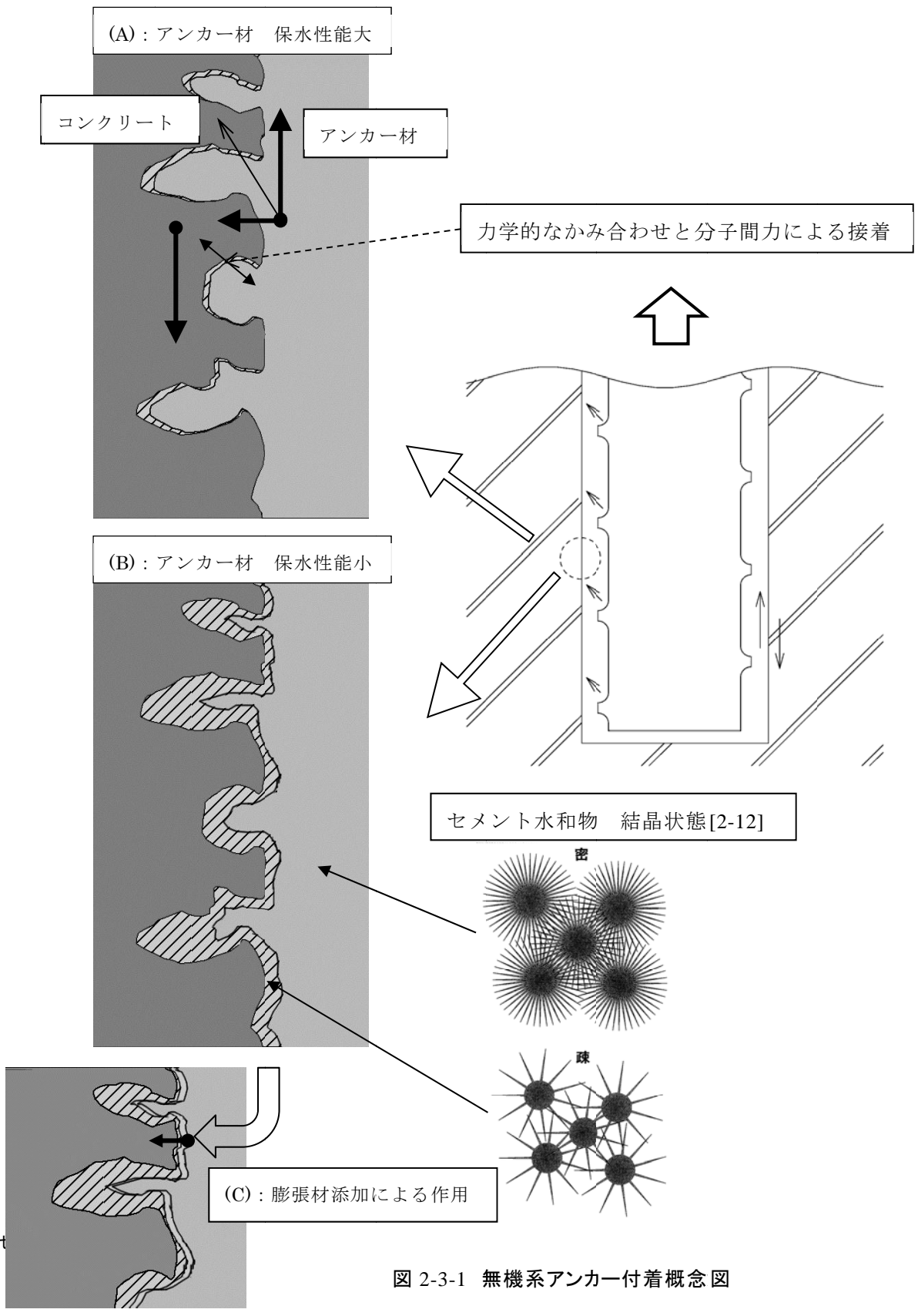


図 2-3-1 無機系アンカー付着概念図

(C) : 保水係数の小さい膨張材の入った材料

コンクリートとの界面で脆弱層が生じるものの、材料の膨張により脆弱層が薄くなり、これによりアンカーの付着強度は増進する。

材料の膨張により界面に生じる力学的なかみ合わせによる接着力が発生するものの、分子間力は低い。

2.4 無機系あと施工アンカーの評価基準の提案

無機系あと施工アンカーにおいて、日本で提案されている材料評価項目では、JR 東日本土木標仕様書のものが最も多く設定しており、評価項目は、圧縮強度、曲げ強度、膨張率、ブリーディング率、クリープの5項目としている。この評価項目の圧縮強度や膨張性についての基準値を設定した試験報告は確認されておらず、基準値は無収縮グラウト材の規格値をそのまま転用しているものと思われる。日本建築あと施工アンカー協会や各種合成における基準値においても、基準の根拠となる試験データは認められておらず、規格値の妥当性がない。

このため、無機系あと施工アンカーについて、妥当な材料の評価基準値を提案する必要がある。無機系あと施工アンカーに必要な性能として、確実な接着性能を確保することである。その他には耐久性等の評価項目が必要であると考えられるが、ここでは接着性能に必要な基準を提案する。

無機系アンカーに必要な性能は、2章2節において、保水性能が重要であることを示し、高い保水性能を保有するものは、コンクリート-アンカー材の界面での十分な付着強度が得られることを明確にした。無機系アンカー材料に保水性能を保有させることで、コンクリート-アンカー材界面に脆弱層を形成させ難くするため、様々なコンクリートに対しても安定した付着性能を発揮すると推測される。

保水率に関する付着試験結果より、基準平均付着強度以上となるアンカー材の保水率は、セメントに普通セメント、超速硬セメントのいずれを用いた場合も80%以上であることを示した。これらの結果より、無機系あと施工アンカー材に必要な性能の一つである保水係数は80%以上が必要である。

その他に無機系アンカーに必要な性能として、材料強度が考えられる。アンカー材には、アンカー筋の節に圧縮力が作用するため、圧縮強度について、基準値を設定すべきと考える。

図 2-4-1 に圧縮強度、保水率と付着強度の関係を示す。保水性能が高く、膨張性のある材料では、付着強度が高い傾向であった。また、本実験におけるアンカー材の圧縮強度は、 45N/mm^2 であり、 45N/mm^2 で保水率80%以上の場合に、付着強度は、基本平均付着強度以上となることが認められた。

表 2-4-1 にコンクリート構造物に適用する断面補修材料の各機関の規格値[2-13~2-15]を示す。断面補修材料の圧縮強度の規格値は、 20N/mm^2 以上または、設計基準値以上となっている。

本研究において、 20N/mm^2 程度のアンカー材の圧縮強度試験は実施しておらず、 20N/mm^2 程度で十分な付着強度が保証できるかは未確認である。断面修復材と同様の考え方をすれば、アンカー材の強度は、躯体の設計強度以上または静弾性係数以上であれば、問題ないものと考えられる。モルタルの弾性係数は、コンクリートに比べ低いため、モルタルにコンクリートと同程度の静弾性係数が必要とした場合は、モルタルの圧縮強度は30～

40N/mm²以上の圧縮強度は必要と考えられる。

アンカー材を構造部材と考えた場合には、静弾性係数の基準値が必要となるものと思われるが、アンカー材の施工厚さは、数 mm 程度の厚さで施工されるため、材料基準値に静弾性係数の必要性については、今後の課題である。

表 2-4-2 に本試験において得られた試験データより、提案する無機系あと施工アンカー材の評価基準値を示す。

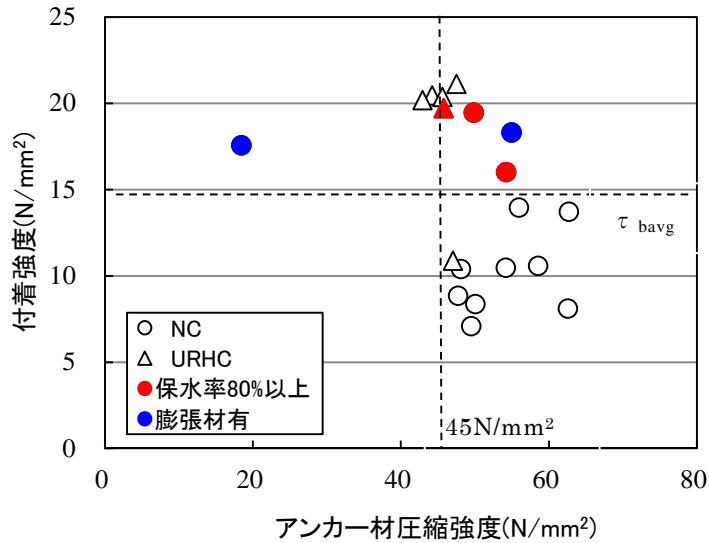


図 2-4-1 アンカー材圧縮強度と付着強度

表 2-4-1 断面補修材料の強度規格値

| | 土木研究センター (建設省総プロ) (平成元年 5 月) | 国土交通省 (建築基準法) (平成 17 年) | NEXCO 構造物施工管理要領 (平成 21 年 7 月) | | |
|------|--|--|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| | コンクリートの 耐久性向上 技術の開発 (塩害補修指針 (案)) | 国交省告示第 1372 号告示第 567 号に て一部改正 (PCaRC 部材のか ぶり厚さについて の検討) | 左官工法用 断面修復材 | 打込み工法用 断面修復材 | 吹付け工法用 断面修復材 |
| 圧縮強度 | 200kgf/cm ² 以上 | 20N/mm ² 以上 | 補修設計で定めた 設計基準強度以上 | 補修設計で定めた 設計基準強度以上 | 補修設計で定めた 設計基準強度以上 |
| 曲げ強度 | - | 6N/mm ² 以上 | - | - | - |

表 2-4-2 本研究で提案する無機系あと施工アンカー材 物性値基準

| | 基準値 | 試験方法 |
|------|------------------------|---------------|
| 圧縮強さ | 45N/mm ² 以上 | JSCE-G552 に準拠 |
| 保水率 | 80% 以上 | JIS A6916 に準拠 |

第2章 まとめ

本章では、無機系あと施工アンカーの定着機構の解明するため、アンカー材の配合によるアンカー筋の引抜き付着強度と材料物性の関係を調べ、無機系あと施工アンカーの付着力に影響を与える主要因を解明した。この結果より、無機系アンカーの付着メカニズムを示し、アンカー材に必要な品質評価基準の提案を行った。

- 1) 付着強度が 20N/mm^2 以下の無機系あと施工アンカーにおいては、コンクリートーアンカー材界面に形成される脆弱層により、付着強度が大きく低下することを明らかにした。
- 2) アンカー材の保水係数とアンカー筋引抜き付着強度に相関性があることを解明し、コンクリートーアンカー材界面に形成される脆弱層を形成させないためには、アンカー材に保水性能を向上させる必要があることを示した。
- 3) アンカー材に膨張性能を保有させることにより、コンクリートーアンカー材界面に脆弱層が形成された場合でも脆弱層を低減させる効果により、アンカー筋引抜き付着強度付着強度は、膨張性能を有しないものより高くなることを示した。
- 4) 無機系あと施工アンカーの付着メカニズムについて、ドライアウト発生の有無による引張力に対する力の伝達機構のモデルを示した。
- 5) 無機系あと施工アンカー材の性能に必要な条件を示し、アンカー材の評価基準として圧縮強度と保水係数の基準値を提案した。

第2章の参考文献

- [2-1] 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，2010改訂版
- [2-2] 日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー・品質基準（金属系・接着），平成13年12月改訂
- [2-3] 榑原ほか：ポリマーセメントモルタルの接着強度に及ぼすコンクリート下地処理方法の影響：材料，Vol.52，No.9，pp.1082-1088，2003.9
- [2-4] 山本高広，若杉三紀夫，大崎敬一：再乳化型粉末樹脂を用いたポリマーセメントモルタルの付着性状（その2）：セメント・コンクリート論文集，Vol.52，pp.400-405，1998
- [2-5] 日本工業規格：JIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法），2006
- [2-6] 日本工業規格：JIS A 1149（コンクリートの静弾性係数試験方法），2010
- [2-7] 日本工業規格：JIS A 1129-3（モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法－第3部：ダイヤルゲージ方法），2010
- [2-8] 日本工業規格：JIS A6916（建築用下地調整材），2014
- [2-9] 日本工業規格：JIS R5201（セメントの物理試験方法），2015
- [2-10] 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編），2012年制定
- [2-11] 浜中昭徳，丸田浩：界面活性効果により打継ぎ一体化を助長するプライマーの検討：コンクリート工学年次論文集，38巻，1号，pp.1941-1946，2016.7
- [2-12] 岩瀬文夫：ひび割れないコンクリートの作り方，日経BP社，p.21，2003
- [2-13] 土木研究センター：「建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発 塩害を受けた土木構造物の補修指針（案）」，1989.5
- [2-14] 国土交通省：国交省告示第1372号告示第567号にて一部改正（プレキャスト鉄筋コンクリート製ポールのコンクリートかぶり厚さについての検討），2005
- [2-15] 高速道路総合技術研究所：構造物施工管理要領，2016，8

第3章

超速硬セメント系注入式 あと施工アンカーの開発

3.1 概要

第2章において、あと施工アンカーの使用量および種類の増加が予想される無機系注入式あと施工アンカーについての評価基準値の提案を行った。

しかしながら、無機系注入式あと施工アンカーは開発されて歴史が浅いため、研究実績、施工実績が少なく、無機系注入式アンカーの基礎物性についての知見はほとんど得られていないため、各種物性について不明な点が多い。そのため、2010年に改定された「各種合成構造設計指針・同解説」[3-1]では、基本平均付着強度の係数は有機系アンカーの1/2と設定されている。これらは、合理的な数値とは言い難く検討の余地がある。そのため、無機系注入式あと施工アンカーについて、基本性能や特徴を明示していく必要がある。

第2章においては、セメントとして一般的に使用されている普通ポルトランドセメントをベース材料とした。しかし、現在、無機系注入式アンカーで使用されているセメントは、超速硬セメントが主流となっている。そのため、超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの物性値を調べることにより、現在使用されている無機系注入式あと施工アンカーの現状の把握が可能となる。ここでは、無機系注入式あと施工アンカーで主流となっている超速硬セメント系注入式アンカーについての付着に関する基礎物性の評価を行った。

3. 2 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの基本物性

評価を行った超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの物性値等を以下に示す。試験に用いた材料は、市販品の材料であり、現在無機系注入式あと施工アンカーで主流となっているものである。

3. 2. 1 材料の配合

試験に用いた超速硬セメント系注入式あと施工アンカーは、カートリッジ内に充填されたプレミックスされた粉体に専用水を注入，攪拌して用いるタイプを用いた。プレミックスされた粉体は，超速硬セメント，乾燥珪砂，増粘剤，凝結時間調整剤，界面活性剤を混合した S/C=1.0 のものである。また，専用水は，凝結時間調整剤を含有した水であり，水結合剤比 0.42 で混合して使用した。超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの配合を表 3-2-1 に示す。

3. 2. 2 材料の使用方法

超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの使用方法を図 3-2-1 に示す。プレミックスされた規定量の粉体の入ったカートリッジに予め計量された専用水を注水し，専用ミキサーを用いてカートリッジ内で混合攪拌を行い，これをコーキングガンに取り付

表 3-2-1 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの配合

| 水結合材比 (%) | 単体量配合 (kg/m ³) | | | |
|--------------|----------------------------|----------------------|-----|-----|
| | 専用水 | 特殊セメント (超速硬セメント系) | 細骨材 | 混和剤 |
| 41.8 | 355 | 850 | 871 | 25 |

専用水：凝結遅延剤を含有する水

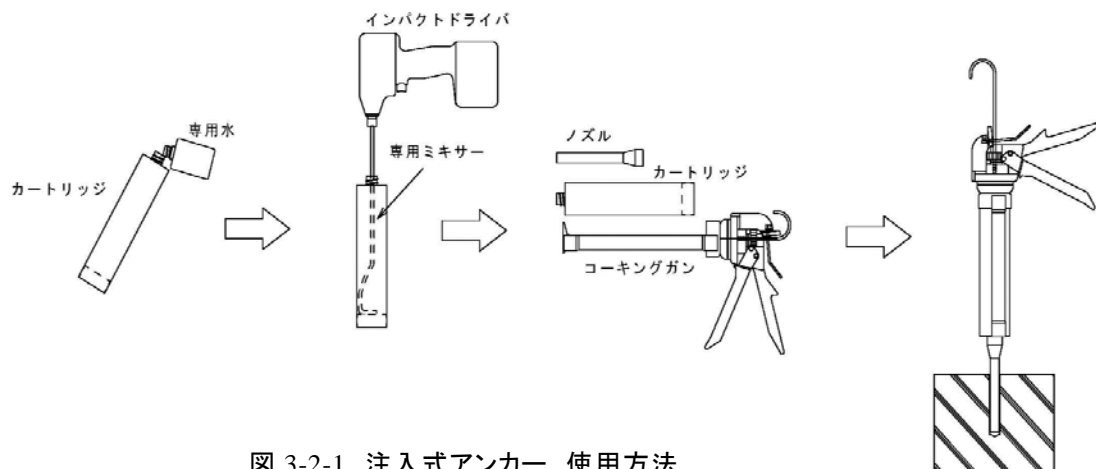


図 3-2-1 注入式アンカー 使用方法

け、穿孔した孔に材料をコーキングガンで注入し、アンカー筋を挿入し鉄筋を定着させる。

3. 2. 3 試験結果

(1) 圧縮強度

20℃の恒温室内に材料を24時間以上静置し、材料の温度を室内温度と同等にし、20℃の恒温室内で試験体の作成を行った。圧縮強度試験に用いた試験体はφ50×100mmの円柱供試体であり、材料を混合した後、型枠に注入ガンを用いて打設し、所定の材齢まで20℃で養生したものを強度試験に用いた。

表3-2-2に圧縮強度試験結果を示す。3時間で20N/mm²以上の強度を発現し、材齢28日では60N/mm²以上の強度であり、第2章で提案した物性基準値以上であった。

(2) 保水率

材料のフレッシュ性状における保水能力を確認するために、「JIS A6916-2014 建築用下地調整材 付属書(A)」のタイル張付け用モルタルの試験方法[3-2]に準じて、2章2節と同様の方法で保水率の測定を行った。

表3-2-3に試験結果を示した。保水率は85%であり、2章で提案した保水率の物性基準値以上であった。

(3) 孔内におけるアンカー材の長さ変化試験

コンクリート孔内でのアンカー材の膨張収縮挙動を確認するため、簡易埋め込み型のモールドゲージを用いて、孔内における長さ変化率の測定を行った。400×800×250mmのコンクリートブロックに、穿孔径φ18mm、深さ78mmで穿孔を行った。穿孔後、母材コンクリートを20℃の恒温室内に移動させ、1日静置した。恒温室内の温度と同等になった母材コンクリートに対し、材料を穿孔した孔内に材料を注入し、その後図3-2-2に示すように、

表 3-2-2 超速硬セメント系アンカーの圧縮強度

| 材齢 | 圧縮強度(N/mm ²) |
|-----|--------------------------|
| 3時間 | 21.9 |
| 6時間 | 30.0 |
| 1日 | 36.5 |
| 3日 | 53.7 |
| 7日 | 55.9 |
| 28日 | 63.5 |

表 3-2-3 超速硬セメント系アンカーの保水係数

| ろ紙の広がり(mm) | 保水率(%) |
|------------|--------|
| 59 | 85 |

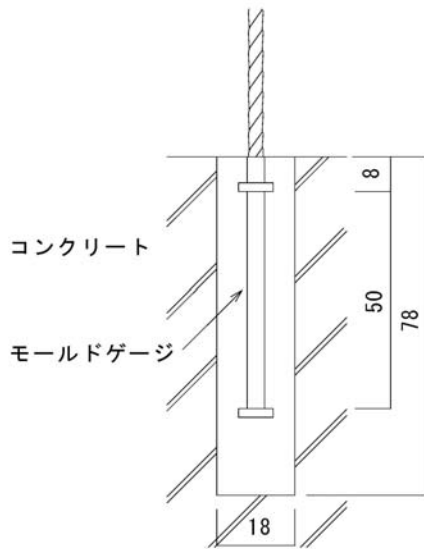


図 3-2-2 せん断試験体および
せん断試験装置

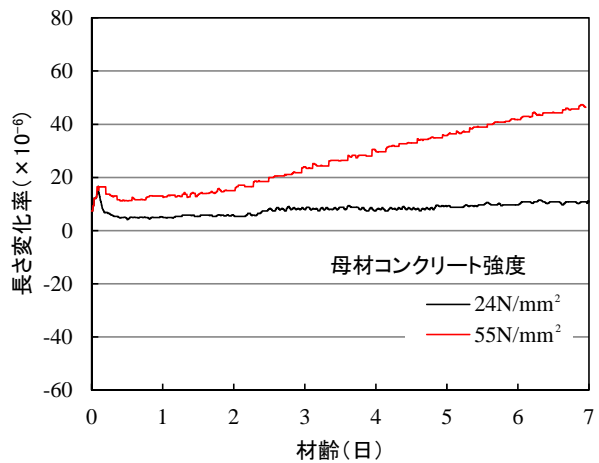


図 3-2-3 孔内におけるアンカー材の長さ変化率

簡易埋め込み型の molds (検長 27mm) を埋め込んで、穿孔内におけるアンカー材の長さ変化を材齢 7 日まで計測した。穿孔内でのアンカー材の長さ変化率の測定結果を図 3-2-3 に示す。コンクリート呼び強度が大きくなるとともに、穿孔内でのアンカー材の長さ変化率は、大きくなる傾向となった。また、どちらのコンクリート呼び強度でも、穿孔内でのアンカー材の長さ変化率は、材齢 7 日においてコンクリート呼び強度 18, 50 で、それぞれ $10.5, 47.0 \times 10^{-6}$ であり、孔内において、材料は膨張していることを確認した。

(4) せん断強度試験

図 3-2-4 に示すせん断試験体および試験装置を使用し、コンクリートとアンカー材のせん断強度試験を行った。せん断強度試験の試験体は、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ のコンクリートを高さ 100mm にカットして 2 つに分け、1 つの切断面に、アンカー材を 3mm 厚になるように塗布し、もう一方のコンクリート片で貼り合わせたものをせん断試験に用いた。コンクリートの乾燥状態による強度へ与える影響を確認するため、乾燥状態と含水状態の 2 種類の状態のコンクリートを用いた。乾燥状態はコンクリートを $20^\circ\text{C}-60\% \text{R.H.}$ で 28 日間乾燥させ、含水状態は、水中で 28 日間浸漬させたものとした。

試験体は、アンカー材とコンクリートとの界面にせん断力が作用するように設置し、載荷速度は、せん断応力度の増加が毎秒 0.06 N/mm^2 とし、各 3 本測定を行った。

表 3-2-4 にせん断強度試験結果をそれぞれ示し、せん断試験後の試験体状況を写真 3-2-1 に示す。含水状態のコンクリートでは、気中で乾燥させた試験体に比べ若干高い値を示した。また、水中養生した試験体の破断面は、コンクリート中のセメントモルタル部分の一部が欠損しており、アンカー材とコンクリートが一体化している状況が確認された。モルタルとコンクリートとの付着は、アンカー効果、拡散接着などが複合的に作用するといわ

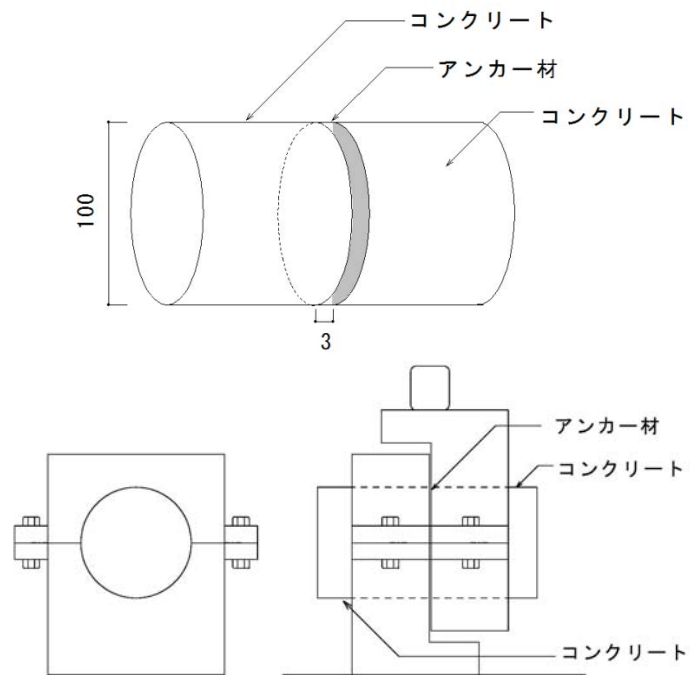


図 3-2-4 せん断試験体およびせん断試験装置

表 3-2-4 せん断強度試験結果

| コンクリート乾燥条件 | 材齢 | せん断強度 | | |
|--------------|----|-------|-------------------|------|
| | | | N/mm ² | Avg. |
| 20°C-60%R.H. | 7d | ① | 3.4 | 2.9 |
| | | ② | 3.0 | |
| | | ③ | 2.4 | |
| 20°C-水中 | 7d | ① | 3.1 | 3.7 |
| | | ② | 4.1 | |
| | | ③ | 3.9 | |

れており[3-3]，無機系アンカー材もこれらの複合作用により付着力が生じているものと推測される。

保水率が高い材料においても乾燥状態のコンクリートでは含水状態のコンクリートより若干低くなることが確認され，保水率の低いものでは，さらに強度は低下するものと推測される。



| | | |
|-------|------|------|
| 乾燥温度: | 20°C | 20°C |
| 養生条件: | 気中 | 水中 |

写真 3-2-1 せん断試験後の試験体破断面

3.3 超速硬セメント系あと施工アンカーの付着に関する検討

3.3.1 基本平均付着強度の評価

(1) 目的

接着系アンカーである無機系注入式あと施工アンカーの付着強度を明らかにするために、松崎、中野らが提案している引き抜き試験方法[3-4]を適用し、超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの基本平均付着強度を調べることを目的とした。

(2) 実験概要

表 3-3-1 に試験体一覧、図 3-3-1 に試験体形状を示す。試験体は、付着試験時のアンカー筋引抜きによるコンクリート割裂防止のため鋼管（外径 216mm，厚さ 4.5mm）で拘束し、付着試験区間は $7d_a$ (d_a : アンカー筋の径) とした。実験要因は、超速硬セメント系注入式あと施工アンカー（PO）と先付け異形鉄筋（CI）の 2 種類とし、コンクリート強度 3 水準 ($\sigma_p=20.2, 39.6, 52.6\text{N/mm}^2$)，およびアンカー筋径 2 水準（D19，D25）とした。

PO の試験体穿孔は、D19 について $\phi 24$ ，D25 については $\phi 32$ で湿式コアドリルにて行った。アンカー定着は、予め上部に PVC 管を挿入しておき、超速硬セメント系注入式あと施工アンカーを注入し、アンカー筋を定着した後、PVC 管を取り除くことにより、付着長さを一定にした試験体を作製した。

図 3-3-2 に加力・測定装置図を示す。加力は付着破壊を起こさせるために反力プレート（厚さ 20mm，孔径 40mm）を試験体の上に設置し、プレートの上にラムチェアおよび球座を設置し、センターホールジャッキにより試験体に引張力を導入した。測定は荷重，自由端および载荷端側のアンカー筋の拔出量とした。

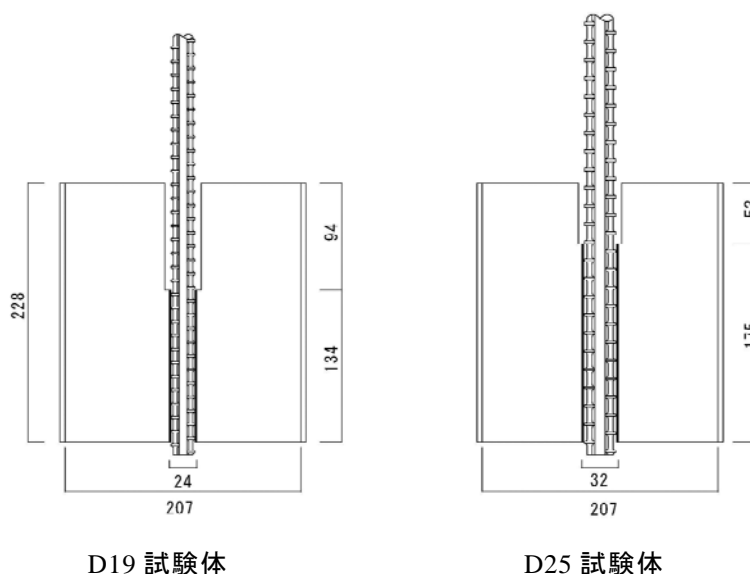


図 3-3-1 試験体形状

表 3-3-1 試験条件

| 試験体名 | アンカー種類 | コンクリート強度/ 静弾性係数 (N/mm ²) | アンカー材強度/ 静弾性係数 (N/mm ²) | アンカー筋 | | 付着長さ (mm) | |
|---------------|--------|---|---|---|-------|--------------|-----|
| | | | | 種類 | 径 | | |
| PO-D19-20-A~C | あと施工 | $\sigma_B = 20.2$ $E_c = 2.21 \times 10^4$ | $\sigma = 71.4$ $E = 2.37 \times 10^4$ | SD980 | D19 | 134 | |
| PO-D25-20-A~C | | | | | D25 | 178 | |
| CI-D19-20-A~C | 先付け | | | 降伏強度/ 静弾性係数 (N/mm ²) | D19 | 134 | |
| CI-D25-20-A~C | | | | | D25 | 178 | |
| PO-D19-40-A~C | あと施工 | $\sigma_B = 39.6$ $E_c = 2.51 \times 10^4$ | | $\sigma = 71.4$ $E = 2.37 \times 10^4$ | D19 : | D19 | 134 |
| PO-D25-40-A~C | | | | | | D25 | 178 |
| CI-D19-40-A~C | 先付け | | | | D19 : | D19 | 134 |
| CI-D25-40-A~C | | | | | | D25 | 178 |
| PO-D19-60-A~C | あと施工 | $\sigma_B = 52.6$ $E_c = 2.83 \times 10^4$ | $\sigma = 71.4$ $E = 2.37 \times 10^4$ | | D25 : | D19 | 134 |
| PO-D25-60-A~C | | | | | | D25 | 178 |
| CI-D19-60-A~C | 先付け | | | | D25 : | D19 | 134 |
| CI-D25-60-A~C | | | | | | D25 | 178 |

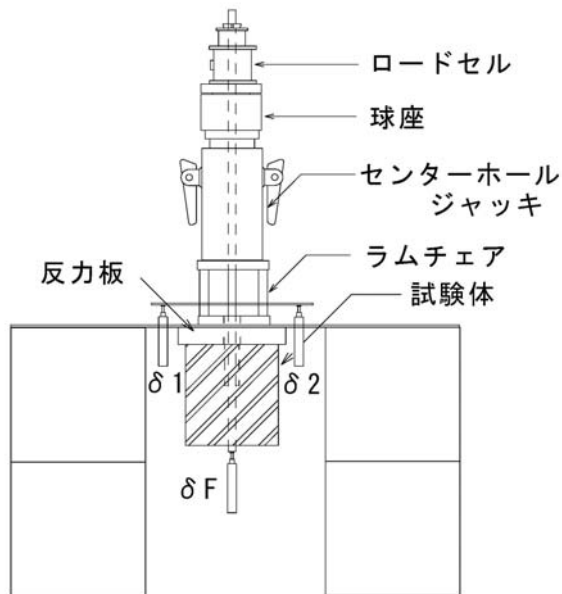


図 3-3-2 加力・測定装置

(3) 実験結果

① 抜き出し性状

図 3-3-3 に D25 のアンカー筋を用いた試験体の荷重と自由端変位，載荷端変位の関係を示す。同一コンクリート強度における最大耐力時の PO の自由端変位は，CI の 1/2~1/3 になっていた。また， $\sigma_B=20.2\text{N/mm}^2$ において，PO の最大耐力は CI の 1.7~2.0 倍と高く， $\sigma_B=39.6\text{N/mm}^2$ では 1.3~1.4 倍， $\sigma_B=52.6\text{N/mm}^2$ では 1.0~1.1 倍となった。超速硬セメント系アンカーの圧縮強度が 60N/mm^2 以上であるため，母材コンクリート強度が低い場合に PO と CI の付着強度に大きな差が表れた。

② 破壊状況

写真 3-3-1 に加力終了後に試験体から引抜いたアンカー筋の接着部分の破壊状況を示す。PO の $\sigma_B=20.2\text{N/mm}^2$ では，鉄筋周りにアンカー材の多くが付着し，コンクリート強度が高くなるとともに，鉄筋周り付着するアンカー材の量が少なくなる傾向が認められた。コンクリート強度が低い場合は，強度の低いコンクリート面での破壊が多くなるためと推測される。

③ 付着強度

図 3-3-4 に付着強度 (τ_{bl}) とコンクリート強度 (σ_B) の関係を示す。付着強度は最大荷

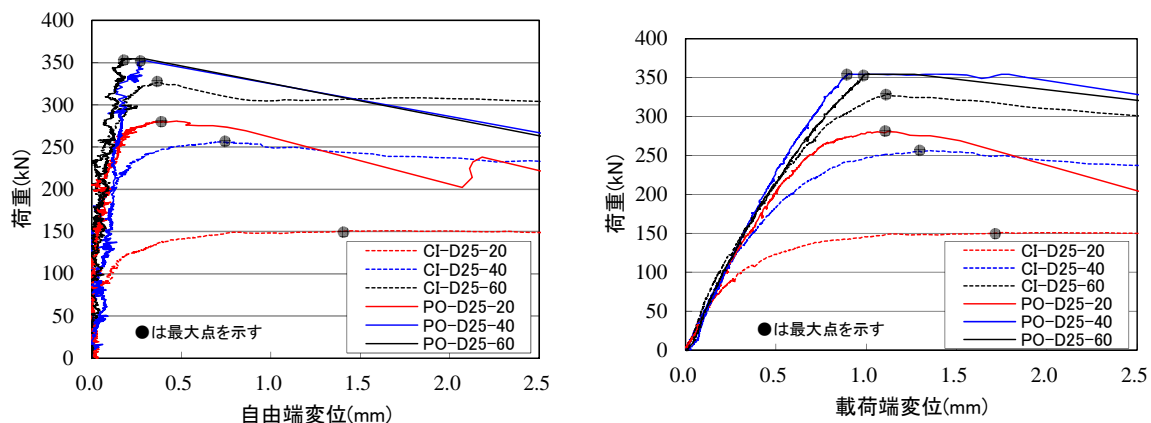


図 3-3-3 荷重変位曲線



写真 3-3-1 アンカー筋周りのアンカー材の破壊状況

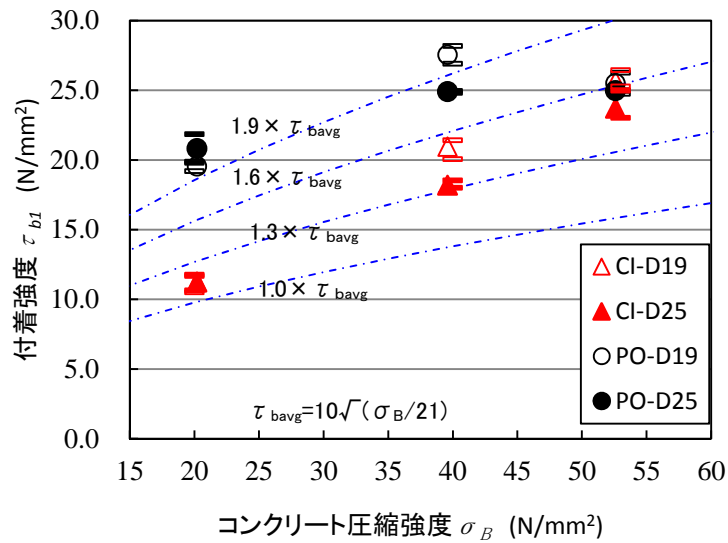


図 3-3-4 コンクリート圧縮強度と付着強度の関係

重をアンカー筋の公称直径 (d_{al}) と付着長さ (l_b) より算出される鉄筋の表面積で除した値 (τ_{bl}) とした。

$\sigma_B=20.2, 39.6, 52.6\text{N/mm}^2$ のそれぞれにおける PO の τ_{bl} は、D19 では、19.2~19.9, 26.9~28.2, 24.7~26.3N/mm², D25 では、19.8~21.8, 24.8~24.9, 25.0~25.0 N/mm² であり、 $\sigma_B=40\text{N/mm}^2$ 以上では、付着強度はほぼ一定となった。

一方 CI では、コンクリート強度とともに付着強度は高くなる傾向となり、 $\sigma_B=20.2, 39.6, 52.6\text{N/mm}^2$ のそれぞれにおける CI の τ_{bl} は、D19 では 10.5~11.7, 20.1~21.4, 25.3~26.4N/mm², D25 では 10.6~11.7, 18.0~18.5, 23.0~25.0 N/mm² であり、コンクリート強度が低いほど、CI と PO の差が大きくなる傾向が認められた。

各種合成構造設計指針・同解説[3-1]等に示されている接着系アンカー（カプセル方式 / 有機系）の基本平均付着強度 ($\tau_{bavg} = 10\sqrt{(\sigma_B/21)}$) に対する CI の τ_{bl} は、 $\sigma_B = 20.2\text{N/mm}^2$ では、1.1~1.2 倍、 $\sigma_B=39.6\text{N/mm}^2$ では 1.3~1.6 倍、 $\sigma_B=52.6\text{N/mm}^2$ では 1.5~1.7 倍となったが、PO の τ_{bl} は、 $\sigma_B=20.2, 39.6, 52.6\text{N/mm}^2$ のそれぞれに対し、 τ_{bavg} の 2.0~2.2 倍 1.8~2.1 倍 1.6~1.7 倍となった。

(4) まとめ

超速硬セメント系注入式あと施工アンカーについて基本平均付着強度を測定し、平均付着強度は鉄筋径で算出した場合、基本平均付着強度 ($\tau_{bavg} = 10\sqrt{(\sigma_B/21)}$) の 1.6 倍以上であることが確認された。

3.3.2 付着強度のばらつき評価

(1) 目的

アンカーの性能は、アンカー材の品質や施工精度、コンクリート強度に影響される。このため、試験結果にばらつきが大きくなることがある。ここでは、評価対象とするアンカー材がどの程度のばらつきを持つものかを調べた。

(2) 実験概要

表 3-3-2 に実験条件を示す。試験には母材コンクリート寸法が 1600mm×1400mm×250mm のものを使用し、上向き施工、横向き施工、下向き施工の 3 方向に各 70 本ずつ計 210 本を 2 日間で施工した施工方向の概要、アンカー筋の施工配置を図 3-3-5、3-3-6 に示す。アンカー筋の施工は、図中の A1~A10、B1~B10 の順番で行った。母材コンクリートに A~G までの 7 列、各 10 か所に施工した。

コンクリート打設から 28 日経過後にアンカー施工を行った。穿孔は湿式コアドリルに

表 3-3-2 試験条件

| 試験体名 | 母材 コンクリート | アンカー材 | アンカー筋 | | | | 付着長さ |
|---|------------------------------|------------------------------|-------|-----|------------------------------|--------------------------------|------|
| | 圧縮強度 (N/mm ²) | 圧縮強度 (N/mm ²) | 種類 | 径 | 降伏強度 (N/mm ²) | 静弾性係数 (kN/mm ²) | (mm) |
| 上向き A1~A10, B1~B10, C1~C10, E1~E10, F1~F10, G1~G10 | 23.0 | 60.8 | MK785 | D13 | 791 | 190 | 91 |
| 横向き A1~A10, B1~B10, C1~C10, E1~E10, F1~F10, G1~G10 | 25.8 | | | | | | |
| 下向き A1~A10, B1~B10, C1~C10, E1~E10, F1~F10, G1~G10 | 25.8 | | | | | | |



図 3-3-5 アンカー筋施工方向

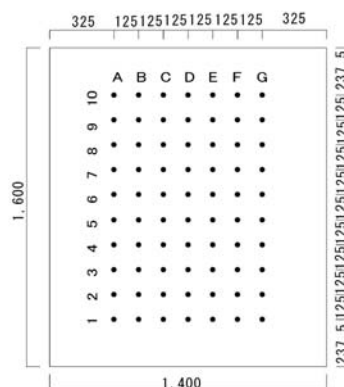


図 3-3-6 アンカー筋配置図

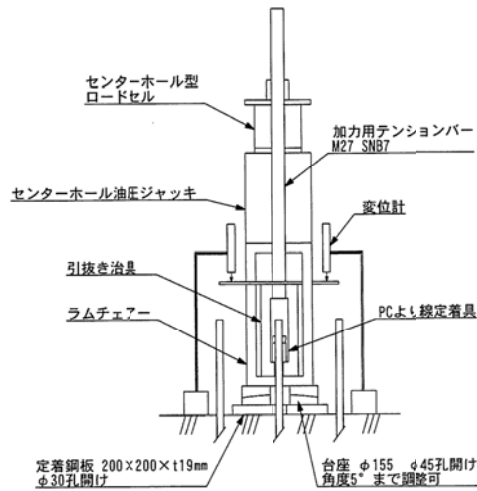


図 3-3-7 測定装置図

て行い、穿孔径は $\phi 18$ 、アンカー筋は高強度鉄筋の D13 を使用した。また、アンカー筋の埋込み長さは $7d_a$ （アンカー筋径の 7 倍）とした。

アンカー施工における穿孔、アンカー材の注入、アンカー筋の定着の工程は施工方向毎に行った。なお、上向き施工においては、アンカー筋の抜け落ち防止およびアンカー筋の定着角度補正のために、アンカー筋挿入直後にくさびを使用してアンカー筋を固定し、硬化前にくさびを取り除いた。くさびを取り外した所には、アンカー材料によりくさびを抜いたときにできた穴を埋めた。

アンカー筋を施工した試験体は、施工 24 時間経過後に施工面が上方になるように設置し、施工 28 日以上経過後に施工面を情報に設置した状態で、各方向 70 本の引抜き試験を実施した。試験はセンターホールジャッキを用い、鋼製治具・PC より線用の定着具を介して実施した。試験測定装置を図 3-3-7 に示す。

付着試験では $\phi 30$ 孔の空いた反力版を用いて拘束試験により行い、付着強度は式 (3-1) で求めた。

$$\tau_{bl} = \frac{P_{\max}}{\pi \cdot d_a \cdot l_b} \quad \text{式 (3-1)}$$

ここで、 τ_{bl} はアンカー筋の付着強度(N/mm²)、 P_{\max} は最大耐力(kN)、 d_a はアンカー筋の公称径(mm)、 l_b はアンカー筋の定着長(mm)である。

(3) 実験結果

試験結果のまとめを表 3-3-3 に、各データを表 3-3-4～3-3-6 に、ヒストグラムを図 3-3-8 に示す。施工状況、試験状況の写真を写真 3-3-2、3-3-3 に示す。コンクリート試験体の中央になる D 列では、コンクリート型枠の継ぎ目となり、母材コンクリートに不陸により、破壊形態が、付着破壊でなくコーン破壊となったために、表から除外した。

表 3-3-3 付着強度試験結果

| | | | A1~A10 | B1~B10 | C1~C10 | E1~E10 | F1~F10 | G1~G10 | |
|----------|---------|------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 上向き | 列別 | 付着強度 | N/mm ² | 25.49 | 26.53 | 26.73 | 27.75 | 28.06 | 27.46 |
| | | 標準偏差 | | 0.57 | 0.99 | 1.39 | 1.06 | 1.13 | 0.84 |
| | | 変動係数 | % | 2.3 | 3.7 | 5.2 | 3.8 | 4.0 | 3.1 |
| | 全体(60本) | 付着強度 | N/mm ² | 27.00 | | | | | |
| | | 標準偏差 | | 1.31 | | | | | |
| | | 変動係数 | % | 4.9 | | | | | |
| 横向き | 列別 | 付着強度 | N/mm ² | 28.18 | 27.11 | 27.16 | 27.76 | 26.98 | 26.95 |
| | | 標準偏差 | | 1.15 | 0.83 | 0.80 | 1.02 | 0.93 | 0.68 |
| | | 変動係数 | % | 4.1 | 3.0 | 2.9 | 3.7 | 3.5 | 2.5 |
| | 全体(60本) | 付着強度 | N/mm ² | 27.36 | | | | | |
| | | 標準偏差 | | 0.99 | | | | | |
| | | 変動係数 | % | 3.6 | | | | | |
| 下向き | 列別 | 付着強度 | N/mm ² | 28.26 | 27.28 | 27.54 | 26.49 | 27.49 | 28.18 |
| | | 標準偏差 | | 1.10 | 0.90 | 0.45 | 1.05 | 0.67 | 0.94 |
| | | 変動係数 | % | 3.9 | 3.3 | 1.7 | 3.9 | 2.5 | 3.3 |
| | 全体(60本) | 付着強度 | N/mm ² | 27.54 | | | | | |
| | | 標準偏差 | | 1.03 | | | | | |
| | | 変動係数 | % | 3.8 | | | | | |
| 全数(180本) | | 付着強度 | N/mm ² | 27.30 | | | | | |
| | | 標準偏差 | | 1.10 | | | | | |
| | | 変動係数 | % | 4.0 | | | | | |

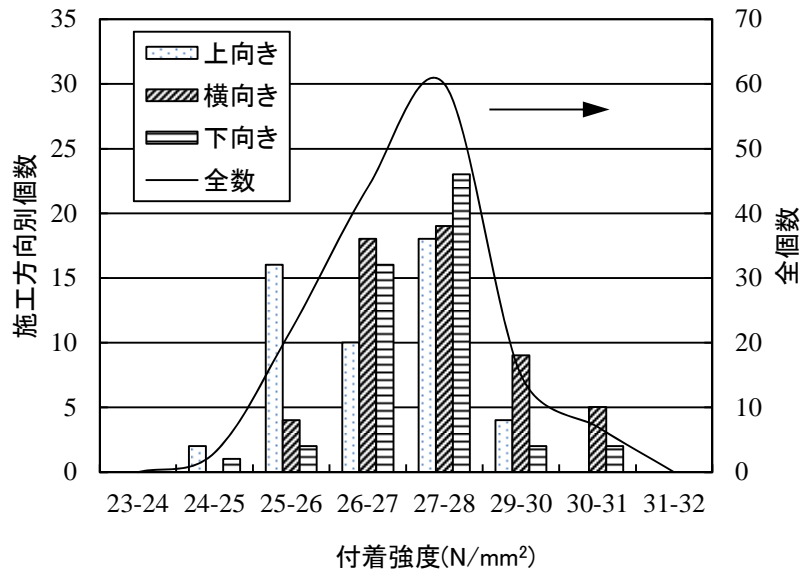


図 3-3-8 度数分布

上向き、横向き、下向き施工による方向別の付着強度の平均値は上向き 27.00、横向き 27.36、下向き 27.54 となった。方向別付着強度の標準偏差および変動係数は、上向き 1.31、4.9%、横向き 0.99、3.6%、下向き 1.03、3.8%となった。これらの結果より施工方向による付着強度に差はなく、標準偏差、変動係数も施工方向による差は見られなかった。

図 3-3-8 より上向き施工では、付着強度分布がバイモーダルな分布となったが、上向き横向き、下向きを合わせた全数の分布では、正規分布に近い分布であり、全数における標



写真 3-3-2 上向き施工状況



写真 3-3-3 試験状況

準偏差は 1.10，変動係数は 4.0%であった。

各種合成構造設計指針・同解説[3-1]等に示されている接着系アンカー（カプセル方式 / 有機系）の基本平均付着強度（ $\tau_{bavg} = 10\sqrt{(\sigma_B/21)}$ ）は， 11N/mm^2 であり，試験における付着強度 τ_{bl} は， τ_{bavg} の約 2.4 倍となった。3 章 2 節のコンクリート強度 40N/mm^2 程度では，D19，D22 の付着強度 τ_{bl} は， τ_{bavg} の 1.8~2.1 倍であったが，D13 ではこれより大きく，コンクリート強度 40N/mm^2 程度では，鉄筋径 D22 までの付着強度 τ_{bl} は， τ_{bavg} の 2 倍以上であることが確認された。

(4) まとめ

超速硬セメント系注入式あと施工アンカーについて，上向き，横向き，下向きに施工を行い，各 60 本の付着強度を測定した。施工方向別の付着強度の平均値に差は見られず，各方向において変動係数は 5%以下であり，超速硬セメント系注入式あと施工アンカーにおいては，付着強度のばらつきが少なく，安定した施工品質が得られることを確認した。

表 3-3-4 上向き付着強度試験結果

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| 最大荷重 (kN) | A1 | 92.83 | B1 | 98.82 | C1 | 91.37 | E1 | 97.36 | F1 | 105.30 | G1 | 98.82 |
| | A2 | 92.34 | B2 | 94.77 | C2 | 96.23 | E2 | 103.03 | F2 | 103.03 | G2 | 99.95 |
| | A3 | 87.48 | B3 | 96.55 | C3 | 88.94 | E3 | 92.34 | F3 | 100.60 | G3 | 101.90 |
| | A4 | 92.18 | B4 | 99.31 | C4 | 102.55 | E4 | 103.36 | F4 | 98.01 | G4 | 101.90 |
| | A5 | 91.53 | B5 | 94.93 | C5 | 90.72 | E5 | 99.14 | F5 | 95.58 | G5 | 101.90 |
| | A6 | 90.23 | B6 | 96.07 | C6 | 94.77 | E6 | 99.47 | F6 | 105.79 | G6 | 94.12 |
| | A7 | 90.40 | B7 | 93.64 | C7 | 99.63 | E7 | 101.57 | F7 | 106.60 | G7 | 105.30 |
| | A8 | 94.45 | B8 | 92.50 | C8 | 99.63 | E8 | 102.55 | F8 | 102.06 | G8 | 97.85 |
| | A9 | 86.35 | B9 | 91.53 | C9 | 101.41 | E9 | 107.57 | F9 | 99.14 | G9 | 100.12 |
| | A10 | 93.96 | B10 | 96.07 | C10 | 106.43 | E10 | 94.12 | F10 | 107.57 | G10 | 94.93 |
| 平均値 | 91.18 | | 95.42 | | 97.17 | | 100.05 | | 102.37 | | 99.68 | |
| 標準偏差 | 2.63 | | 2.50 | | 5.72 | | 4.57 | | 4.01 | | 3.40 | |
| 変動係数(%) | 2.88 | | 2.62 | | 5.89 | | 4.57 | | 3.91 | | 3.41 | |
| 全体 | 平均値 | 97.64 | | | | | | | | | | |
| | 標準偏差 | 5.28 | | | | | | | | | | |
| | 変動係数(%) | 5.4 | | | | | | | | | | |
| 有効埋込み長さ (mm) | A1 | 90.85 | B1 | 89.98 | C1 | 90.89 | E1 | 91.13 | F1 | 92.48 | G1 | 90.39 |
| | A2 | 90.43 | B2 | 90.42 | C2 | 91.17 | E2 | 89.28 | F2 | 95.30 | G2 | 87.97 |
| | A3 | 90.58 | B3 | 86.94 | C3 | 86.49 | E3 | 89.63 | F3 | 94.25 | G3 | 93.08 |
| | A4 | 90.08 | B4 | 89.96 | C4 | 90.30 | E4 | 91.74 | F4 | 88.08 | G4 | 92.95 |
| | A5 | 89.16 | B5 | 89.58 | C5 | 90.60 | E5 | 88.13 | F5 | 90.92 | G5 | 92.24 |
| | A6 | 88.18 | B6 | 88.93 | C6 | 94.50 | E6 | 90.91 | F6 | 90.56 | G6 | 90.19 |
| | A7 | 90.31 | B7 | 90.99 | C7 | 90.60 | E7 | 92.81 | F7 | 90.85 | G7 | 92.35 |
| | A8 | 89.62 | B8 | 91.32 | C8 | 89.84 | E8 | 89.49 | F8 | 90.84 | G8 | 88.32 |
| | A9 | 85.91 | B9 | 92.13 | C9 | 93.83 | E9 | 92.73 | F9 | 89.99 | G9 | 91.01 |
| | A10 | 91.23 | B10 | 91.49 | C10 | 93.00 | E10 | 87.74 | F10 | 91.37 | G10 | 91.58 |
| 付着強度 (kN/mm ²) | A1 | 25.61 | B1 | 27.53 | C1 | 25.20 | E1 | 26.78 | F1 | 28.54 | G1 | 27.40 |
| | A2 | 25.59 | B2 | 26.27 | C2 | 26.45 | E2 | 28.92 | F2 | 27.10 | G2 | 28.48 |
| | A3 | 24.21 | B3 | 27.83 | C3 | 25.77 | E3 | 25.82 | F3 | 26.75 | G3 | 27.44 |
| | A4 | 25.65 | B4 | 27.67 | C4 | 28.46 | E4 | 28.24 | F4 | 27.89 | G4 | 27.48 |
| | A5 | 25.73 | B5 | 26.56 | C5 | 25.10 | E5 | 28.19 | F5 | 26.35 | G5 | 27.69 |
| | A6 | 25.65 | B6 | 27.08 | C6 | 25.14 | E6 | 27.42 | F6 | 29.28 | G6 | 26.16 |
| | A7 | 25.09 | B7 | 25.79 | C7 | 27.56 | E7 | 27.43 | F7 | 29.41 | G7 | 28.58 |
| | A8 | 26.41 | B8 | 25.39 | C8 | 27.80 | E8 | 28.72 | F8 | 28.16 | G8 | 27.77 |
| | A9 | 25.19 | B9 | 24.90 | C9 | 27.09 | E9 | 29.07 | F9 | 27.61 | G9 | 27.57 |
| | A10 | 25.81 | B10 | 26.32 | C10 | 28.68 | E10 | 26.89 | F10 | 29.51 | G10 | 25.98 |
| 平均値 | 25.49 | | 26.53 | | 26.72 | | 27.75 | | 28.06 | | 27.45 | |
| 標準偏差 | 0.58 | | 0.99 | | 1.39 | | 1.06 | | 1.13 | | 0.84 | |
| 変動係数(%) | 2.26 | | 3.75 | | 5.19 | | 3.82 | | 4.02 | | 3.06 | |
| 全体 | 平均値 | 27.00 | | | | | | | | | | |
| | 標準偏差 | 1.31 | | | | | | | | | | |
| | 変動係数(%) | 4.9 | | | | | | | | | | |

表 3-3-5 横向き付着強度試験結果

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|
| 最大荷重 (kN) | A1 | 107.41 | B1 | 96.55 | C1 | 95.58 | E1 | 102.87 | F1 | 95.26 | G1 | 95.58 |
| | A2 | 106.76 | B2 | 98.01 | C2 | 94.93 | E2 | 99.63 | F2 | 95.42 | G2 | 99.31 |
| | A3 | 107.08 | B3 | 100.12 | C3 | 98.98 | E3 | 98.33 | F3 | 91.37 | G3 | 95.90 |
| | A4 | 99.79 | B4 | 96.39 | C4 | 97.20 | E4 | 101.74 | F4 | 97.36 | G4 | 98.01 |
| | A5 | 107.73 | B5 | 101.90 | C5 | 102.71 | E5 | 94.61 | F5 | 100.44 | G5 | 102.06 |
| | A6 | 96.39 | B6 | 100.28 | C6 | 101.09 | E6 | 97.36 | F6 | 104.00 | G6 | 99.14 |
| | A7 | 99.95 | B7 | 101.57 | C7 | 94.93 | E7 | 104.50 | F7 | 104.98 | G7 | 95.90 |
| | A8 | 101.74 | B8 | 98.01 | C8 | 99.31 | E8 | 102.38 | F8 | 104.33 | G8 | 96.71 |
| | A9 | 99.47 | B9 | 89.75 | C9 | 100.12 | E9 | 103.68 | F9 | 96.71 | G9 | 95.74 |
| | A10 | 100.44 | B10 | 96.39 | C10 | 100.12 | E10 | 95.26 | F10 | 93.31 | G10 | 94.61 |
| 平均値 | 102.68 | | 97.90 | | 98.50 | | 100.04 | | 98.32 | | 97.30 | |
| 標準偏差 | 4.16 | | 3.54 | | 2.71 | | 3.53 | | 4.85 | | 2.30 | |
| 変動係数(%) | 4.05 | | 3.62 | | 2.76 | | 3.53 | | 4.94 | | 2.36 | |
| 全体 | 平均値 | 99.12 | | | | | | | | | | |
| | 標準偏差 | 3.90 | | | | | | | | | | |
| | 変動係数(%) | 3.9 | | | | | | | | | | |
| 有効埋込み長さ (mm) | A1 | 91.72 | B1 | 88.85 | C1 | 91.10 | E1 | 91.18 | F1 | 90.43 | G1 | 88.93 |
| | A2 | 91.12 | B2 | 89.90 | C2 | 90.74 | E2 | 92.40 | F2 | 91.08 | G2 | 91.17 |
| | A3 | 91.48 | B3 | 89.49 | C3 | 92.67 | E3 | 88.90 | F3 | 89.17 | G3 | 90.64 |
| | A4 | 88.50 | B4 | 89.16 | C4 | 92.20 | E4 | 91.26 | F4 | 89.61 | G4 | 89.94 |
| | A5 | 92.54 | B5 | 91.96 | C5 | 91.21 | E5 | 89.47 | F5 | 91.55 | G5 | 91.58 |
| | A6 | 90.82 | B6 | 91.53 | C6 | 90.68 | E6 | 89.54 | F6 | 94.10 | G6 | 90.37 |
| | A7 | 95.64 | B7 | 91.83 | C7 | 89.79 | E7 | 88.50 | F7 | 93.36 | G7 | 89.70 |
| | A8 | 91.87 | B8 | 91.41 | C8 | 90.51 | E8 | 90.94 | F8 | 92.72 | G8 | 92.36 |
| | A9 | 89.55 | B9 | 89.42 | C9 | 89.27 | E9 | 90.42 | F9 | 90.12 | G9 | 87.73 |
| | A10 | 90.19 | B10 | 91.33 | C10 | 90.96 | E10 | 90.66 | F10 | 90.83 | G10 | 92.55 |
| 付着強度 (kN/mm ²) | A1 | 29.35 | B1 | 27.24 | C1 | 26.30 | E1 | 28.28 | F1 | 26.40 | G1 | 26.94 |
| | A2 | 29.37 | B2 | 27.32 | C2 | 26.22 | E2 | 27.02 | F2 | 26.26 | G2 | 27.30 |
| | A3 | 29.34 | B3 | 28.04 | C3 | 26.77 | E3 | 27.72 | F3 | 25.68 | G3 | 26.52 |
| | A4 | 28.26 | B4 | 27.10 | C4 | 26.42 | E4 | 27.94 | F4 | 27.23 | G4 | 27.31 |
| | A5 | 29.18 | B5 | 27.77 | C5 | 28.22 | E5 | 26.50 | F5 | 27.50 | G5 | 27.93 |
| | A6 | 26.60 | B6 | 27.46 | C6 | 27.94 | E6 | 27.25 | F6 | 27.70 | G6 | 27.50 |
| | A7 | 26.19 | B7 | 27.72 | C7 | 26.50 | E7 | 29.60 | F7 | 28.18 | G7 | 26.80 |
| | A8 | 27.76 | B8 | 26.87 | C8 | 27.50 | E8 | 28.22 | F8 | 28.20 | G8 | 26.24 |
| | A9 | 27.84 | B9 | 25.16 | C9 | 28.11 | E9 | 28.74 | F9 | 26.90 | G9 | 27.35 |
| | A10 | 27.91 | B10 | 26.45 | C10 | 27.59 | E10 | 26.34 | F10 | 25.75 | G10 | 25.62 |
| 平均値 | 28.18 | | 27.11 | | 27.16 | | 27.76 | | 26.98 | | 26.95 | |
| 標準偏差 | 1.15 | | 0.83 | | 0.80 | | 1.01 | | 0.93 | | 0.68 | |
| 変動係数(%) | 4.09 | | 3.05 | | 2.93 | | 3.65 | | 3.46 | | 2.52 | |
| 全体 | 平均値 | 27.36 | | | | | | | | | | |
| | 標準偏差 | 0.99 | | | | | | | | | | |
| | 変動係数(%) | 3.6 | | | | | | | | | | |

表 3-3-6 下向き付着強度試験結果

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 最大荷重 (kN) | A1 | 108.22 | B1 | 104.98 | C1 | 101.90 | E1 | 92.66 | F1 | 102.22 | G1 | 102.22 |
| | A2 | 103.52 | B2 | 107.57 | C2 | 102.22 | E2 | 96.23 | F2 | 104.81 | G2 | 110.16 |
| | A3 | 103.36 | B3 | 99.31 | C3 | 102.22 | E3 | 102.71 | F3 | 106.27 | G3 | 107.41 |
| | A4 | 104.33 | B4 | 102.22 | C4 | 101.57 | E4 | 104.33 | F4 | 104.65 | G4 | 107.24 |
| | A5 | 108.70 | B5 | 102.55 | C5 | 97.85 | E5 | 99.47 | F5 | 101.57 | G5 | 102.55 |
| | A6 | 99.63 | B6 | 95.42 | C6 | 101.90 | E6 | 106.60 | F6 | 98.33 | G6 | 97.69 |
| | A7 | 102.87 | B7 | 104.00 | C7 | 100.28 | E7 | 90.07 | F7 | 100.12 | G7 | 103.68 |
| | A8 | 102.87 | B8 | 100.44 | C8 | 100.28 | E8 | 101.41 | F8 | 102.22 | G8 | 109.67 |
| | A9 | 104.33 | B9 | 99.47 | C9 | 103.68 | E9 | 98.33 | F9 | 104.17 | G9 | 107.57 |
| | A10 | 96.71 | B10 | 101.74 | C10 | 101.09 | E10 | 97.85 | F10 | 104.17 | G10 | 101.57 |
| 平均値 | 103.45 | | 101.77 | | 101.30 | | 98.97 | | 102.85 | | 104.98 | |
| 標準偏差 | 3.54 | | 3.39 | | 1.57 | | 5.11 | | 2.42 | | 4.04 | |
| 変動係数(%) | 3.42 | | 3.33 | | 1.55 | | 5.17 | | 2.35 | | 3.84 | |
| 全体 | 平均値 | 102.22 | | | | | | | | | | |
| | 標準偏差 | 3.87 | | | | | | | | | | |
| | 変動係数(%) | 3.8 | | | | | | | | | | |
| 有効埋込み長さ (mm) | A1 | 92.61 | B1 | 95.34 | C1 | 91.07 | E1 | 88.83 | F1 | 94.77 | G1 | 95.03 |
| | A2 | 92.15 | B2 | 92.78 | C2 | 91.97 | E2 | 90.43 | F2 | 93.32 | G2 | 91.78 |
| | A3 | 91.66 | B3 | 92.79 | C3 | 92.06 | E3 | 97.08 | F3 | 93.29 | G3 | 93.99 |
| | A4 | 91.33 | B4 | 94.90 | C4 | 90.95 | E4 | 92.76 | F4 | 94.18 | G4 | 94.60 |
| | A5 | 89.65 | B5 | 92.00 | C5 | 91.69 | E5 | 94.26 | F5 | 92.85 | G5 | 91.61 |
| | A6 | 90.45 | B6 | 92.75 | C6 | 93.33 | E6 | 95.81 | F6 | 94.37 | G6 | 90.63 |
| | A7 | 91.15 | B7 | 93.54 | C7 | 90.95 | E7 | 92.60 | F7 | 92.98 | G7 | 95.05 |
| | A8 | 94.75 | B8 | 94.84 | C8 | 93.36 | E8 | 96.13 | F8 | 93.08 | G8 | 95.87 |
| | A9 | 92.25 | B9 | 93.07 | C9 | 93.46 | E9 | 93.74 | F9 | 94.60 | G9 | 94.10 |
| | A10 | 91.93 | B10 | 93.05 | C10 | 93.13 | E10 | 94.69 | F10 | 94.30 | G10 | 90.92 |
| 付着強度 (kN/mm ²) | A1 | 29.29 | B1 | 27.60 | C1 | 28.04 | E1 | 26.14 | F1 | 27.03 | G1 | 26.96 |
| | A2 | 28.16 | B2 | 29.06 | C2 | 27.86 | E2 | 26.67 | F2 | 28.15 | G2 | 30.08 |
| | A3 | 28.26 | B3 | 26.82 | C3 | 27.83 | E3 | 26.52 | F3 | 28.55 | G3 | 28.64 |
| | A4 | 28.63 | B4 | 27.00 | C4 | 27.99 | E4 | 28.19 | F4 | 27.85 | G4 | 28.41 |
| | A5 | 30.39 | B5 | 27.94 | C5 | 26.75 | E5 | 26.45 | F5 | 27.42 | G5 | 28.06 |
| | A6 | 27.61 | B6 | 25.79 | C6 | 27.37 | E6 | 27.89 | F6 | 26.12 | G6 | 27.02 |
| | A7 | 28.29 | B7 | 27.87 | C7 | 27.63 | E7 | 24.38 | F7 | 26.99 | G7 | 27.34 |
| | A8 | 27.21 | B8 | 26.54 | C8 | 26.92 | E8 | 26.44 | F8 | 27.52 | G8 | 28.67 |
| | A9 | 28.35 | B9 | 26.79 | C9 | 27.80 | E9 | 26.29 | F9 | 27.60 | G9 | 28.65 |
| | A10 | 26.37 | B10 | 27.40 | C10 | 27.21 | E10 | 25.90 | F10 | 27.69 | G10 | 28.00 |
| 平均値 | 28.25 | | 27.28 | | 27.54 | | 26.49 | | 27.49 | | 28.18 | |
| 標準偏差 | 1.10 | | 0.90 | | 0.46 | | 1.05 | | 0.67 | | 0.94 | |
| 変動係数(%) | 3.89 | | 3.32 | | 1.66 | | 3.95 | | 2.45 | | 3.33 | |
| 全体 | 平均値 | 27.54 | | | | | | | | | | |
| | 標準偏差 | 1.03 | | | | | | | | | | |
| | 変動係数(%) | 3.8 | | | | | | | | | | |

3.3.3 穿孔径の影響に関する検討

(1) 目的

あと施工アンカーは、材料だけでなく、施工条件、環境条件により付着強度が変化することが考えられる。ここでは、超速硬セメント系注入式アンカーについて、試験体作製時の影響が考えられる穿孔径が付着強度へ及ぼす影響について検討を行った。

(2) 実験概要

実験水準を表 3-3-7 に示す。穿孔径は、 $\phi 16, 18, 20, 25\text{mm}$ とし、コアドリルを使用し、深さ約 80mm で穿孔した。孔に超速硬セメント系アンカー材を充填し、アンカー筋 $D13$ を埋込み長さが $6d_a$ (78mm) となるようアンカー筋を定着させた。

試験は、 20°C の条件下で、あと施工アンカー施工 7 日後に実施した。図 3-3-9 に試験体および加力・測定装置図を示す。加力は付着破壊を起こさせるために反力プレート（孔径： 26mm ）を試験体の上に設置し、プレートの上にラムチェアおよび球座を設置し、センターホールジャッキにより試験体に引張力を導入した。測定は荷重および載荷端側のアンカー筋の拔出量とした。

(3) 実験結果

表 3-3-8、図 3-3-10 に付着強度試験結果を示す。アンカー筋の径が一定の場合、穿孔径 $\phi 16, 18, 20, 25\text{mm}$ の付着強度の平均は、 $30.4, 30.6, 30.6, 32.4\text{N/mm}^2$ であり、鉄筋径の 2 倍程度までの穿孔径において、付着強度の低下は認められなかった。

図 3-3-11 に穿孔径別の荷重－変位曲線を示す。本研究で実施した穿孔径の範囲では、アンカー筋と孔内壁のクリアランスの違いによる、剛性におよぼす影響は確認されなかった。なお、各アンカー筋の破壊状況は、いずれもアンカー材とアンカー筋の界面が主な破断箇

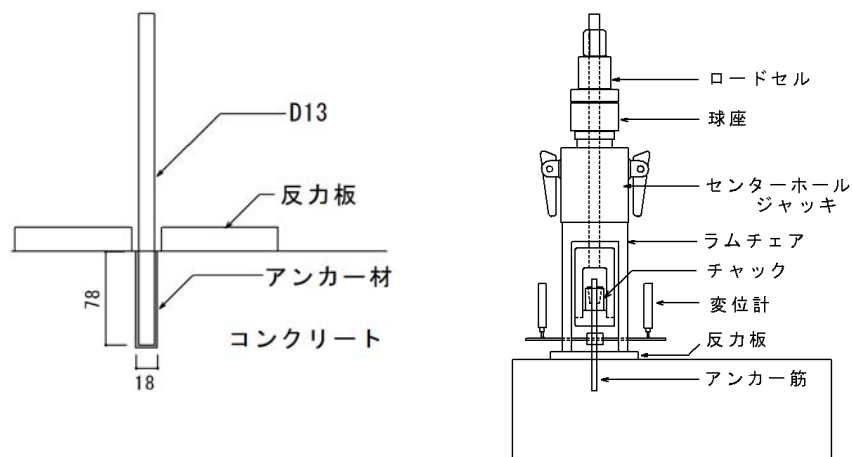


図 3-3-9 測定装置図

表 3-3-7 試験条件

| 埋込み長さ | 穿孔径 | コンクリート | アンカー材 | アンカー筋 |
|-----------------|------|---------------------------------|---------------------------------|---|
| 6d _a | φ 16 | 圧縮強度 24.3N/mm ² | 圧縮強度 63.5N/mm ² | 種類 MK785 呼び径 D13 降伏強度 791N/mm ² 静弾性係数 190kN/mm ² |
| | φ 18 | | | |
| | φ 20 | 静弾性係数 28.4kN/mm ² | 静弾性係数 25.0kN/mm ² | |
| | φ 25 | | | |

表 3-3-8 付着試験結果

| 試験体 | | 穿孔径 (mm) | 定着長 (mm) | 鉄筋径 | 最大荷重 (kN) | 付着強度 (N/mm ²) | 最大値時変位 (mm) |
|------|------|-------------|-------------|------|--------------|------------------------------|----------------|
| | | | | (mm) | | | |
| φ 16 | 1 | 16.5 | 79.2 | 12.7 | 98.9 | 31.3 | 0.92 |
| | 2 | 16.8 | 82.1 | 12.7 | 98.2 | 30.0 | 0.91 |
| | 3 | 16.8 | 79.7 | 12.7 | 100.1 | 31.5 | 0.76 |
| | 4 | 16.8 | 80.1 | 12.7 | 95.3 | 29.8 | 0.79 |
| | 5 | 16.6 | 81.0 | 12.7 | 95.8 | 29.6 | 0.64 |
| | Avg. | 16.7 | 80.4 | 12.7 | 97.7 | 30.4 | 0.80 |
| φ 18 | 1 | 18.2 | 80.7 | 12.7 | 98.9 | 30.7 | 0.82 |
| | 2 | 18.2 | 78.8 | 12.7 | 93.7 | 29.8 | 0.74 |
| | 3 | 18.3 | 79.2 | 12.7 | 95.2 | 30.1 | 0.75 |
| | 4 | 18.3 | 78.9 | 12.7 | 96.8 | 30.7 | 0.65 |
| | 5 | 18.4 | 78.5 | 12.7 | 99.5 | 31.8 | 0.98 |
| | Avg. | 18.3 | 79.2 | 12.7 | 96.8 | 30.6 | 0.79 |
| φ 20 | 1 | 20.1 | 78.7 | 12.7 | 94.4 | 30.0 | 1.09 |
| | 2 | 20.1 | 79.7 | 12.7 | 97.2 | 30.6 | 0.72 |
| | 3 | 20.0 | 79.8 | 12.7 | 97.1 | 30.5 | 0.77 |
| | 4 | 20.1 | 78.7 | 12.7 | 105.5 | 33.6 | 0.81 |
| | 5 | 20.1 | 78.5 | 12.7 | 89.4 | 28.5 | 0.64 |
| | Avg. | 20.1 | 79.1 | 12.7 | 96.7 | 30.6 | 0.80 |
| φ 25 | 1 | 25.4 | 80.1 | 12.7 | 96.4 | 30.2 | 0.84 |
| | 2 | 24.9 | 77.2 | 12.7 | 102.6 | 33.3 | 0.89 |
| | 3 | 25.4 | 78.3 | 12.7 | 109.6 | 35.1 | 1.04 |
| | 4 | 25.2 | 78.0 | 12.7 | 97.4 | 31.3 | 1.07 |
| | 5 | 25.0 | 78.3 | 12.7 | 101.0 | 32.3 | 1.04 |
| | Avg. | 25.2 | 78.4 | 12.7 | 101.4 | 32.4 | 0.98 |

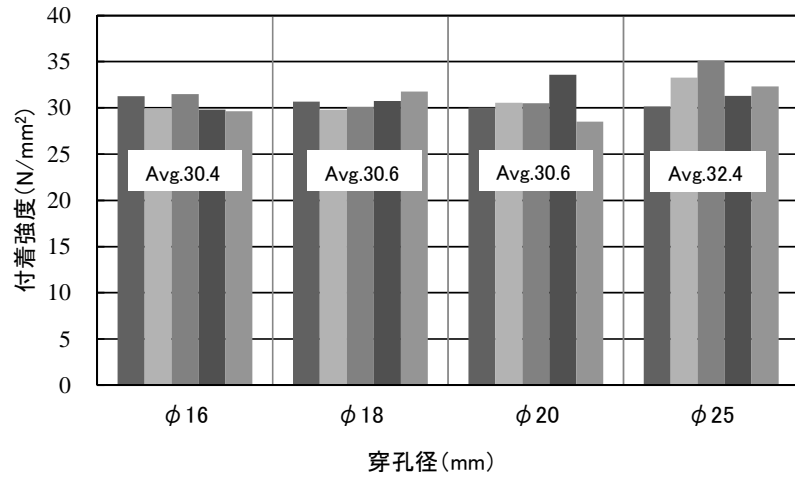


図 3-3-10 付着強度試験結果

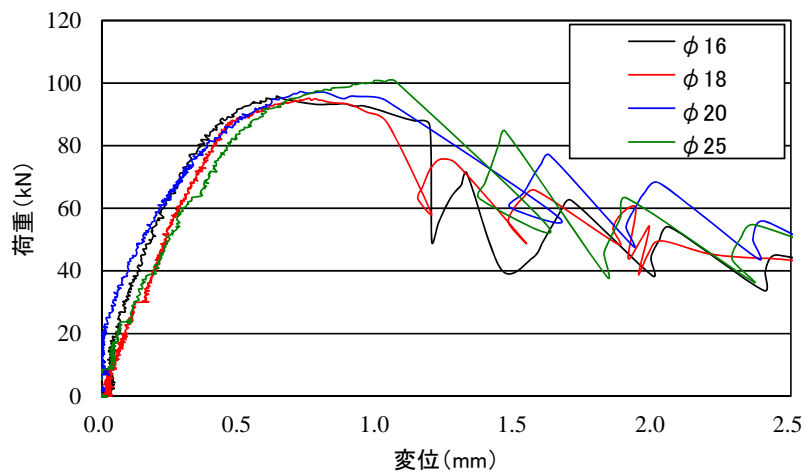


図 3-3-11 荷重変位曲線

所であった。また、いずれの穿孔径においても 90kN 程度で変位が大きくなる傾向が認められた。鉄筋の降伏耐力は約 100kN であるため、鉄筋の引き抜けが 90kN 程度から徐々に生じたものと推測された。

(4) まとめ

穿孔径による付着強度への影響は、穿孔径 φ16, 18, 20, 25mm ではみられず、穿孔径の 2 倍程度までは、穿孔径は付着強度に影響を与えなかった。

第3章 まとめ

本章では、現在、無機系注入式あと施工アンカーで主流となっている超速硬セメント系注入式アンカーについて、材料の基本物性値を把握し、アンカー材としての付着性能、各種施工条件が付着強度に及ぼす影響に関する評価を行った。

- 1) 一般的に使用されている超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの材料物性値である 28 日圧縮強度は、 60N/mm^2 以上、保水係数は 0.85 と保水能力の高いものであり、2 章で提案した評価基準値を十分に上回るものであった。
- 2) 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着強度は、コンクリート強度 $20\sim 50\text{N/mm}^2$ の範囲において、アンカーの設計において使用される付着強度を算定するための基本平均付着強度 ($\tau_{avg}=10\sqrt{(\sigma_B/21)}$) の 1.6 倍以上であることを確認した。
- 3) 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーについて、アンカー筋に D13 を使用し上向き、横向き、下向きの施工を行い、施工方向の違いによる付着強度のばらつきを確認した。施工方向による付着強度には差が認められず、付着強度は 27N/mm^2 以上であり、変動係数は 5% 以下と小さなものであることを確認した。
- 4) 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの穿孔径の影響を調べ、穿孔径の 2 倍程度までは、穿孔径が大きくなることによる付着強度に与える影響は認められないことを示した。

第3章での参考文献

- [3-1] 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，2010改訂版
- [3-2] 日本工業規格：JIS A6919（建築用下地調整材），2014
- [3-3] 朴同天，兼松学，野口貴文：垂直一せん断荷重を受ける断面修復材の付着強度に関する研究，
コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No1，pp.1761-1766，2004.8
- [3-4] 中野克彦，松崎育弘，杉山智昭：接着系あと施工アンカーの基本平均付着強度に関する実験的
研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造IV，pp.149~150,2009.8

第4章

超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの 長期持続荷重に関する評価

4.1 概要

接着系あと施工アンカーを安全に使用するために、長期耐久性のデータが必要とされている。特に、長期的な持続荷重に対し、クリープ変形量の増大、クリープによる引抜けが懸念されている。2012年の中央道笹子トンネルの天井板崩落事故以降、あと施工アンカーのクリープに関する研究が増加したものの、クリープ試験には長期間にわたる試験となるため、現状では、あと施工アンカーについてのクリープ試験データは少ない。

また、現在日本において、あと施工アンカーのクリープ試験方法は確立していないため、試験者により測定条件が異なり、得られるデータの比較が困難であり、そのため、早期の試験方法の確立が望まれている。

ここでは、第3章で物性値を確認した超速硬セメント系注入式アンカーを基礎材料として、長期持続荷重に対する試験を行い、クリープに影響を及ぼす各種要因を検討し、長期持続荷重の評価方法を検討した。

試験方法について、クリープ試験装置を新たに製作し、製作した装置の検証を行った。この検証結果に基づき、クリープ試験方法を確立した。クリープに及ぼす各種影響については、コンクリート強度、鉄筋径、拘束方法があと施工アンカーのクリープに及ぼす影響を調べた。また、あと施工アンカーでの使用量の多い有機系アンカーと今後使用量が増加すると考えられる無機系アンカーのクリープ挙動の比較を行い、クリープ試験条件およびクリープ評価方法の提案を行った。

4.2 クリープ試験装置の検証

4.2.1 目的

平成20～22年度に実施された建築基準整備促進事業「あと施工アンカーの長期許容応力度に関する検討調査」において、アンカーのクリープ性能について、カウンターウェイト方式とばね方式のクリープ試験装置による評価が行われた[4-1]。同一条件下においてカウンターウェイト方式とばね方式では、試験装置によるクリープ変形に顕著な差は認められず、試験室の環境状況、振動等による影響、載荷方法が課題となった。

ここでは、クリープ破壊の測定が可能なばね式クリープ試験機を製作し、アンカーの引張クリープ試験装置の検証を行い、クリープ試験方法の確立を目的とした。

4.2.2 実験概要

(1) 使用材料および試験体の作製方法

実験には、第3章で物性を確認した超速硬セメント系注入式あと施工アンカーを使用した。試験に使用した母材コンクリートは、内径350mmのボイド管を長さ200mmにカットしてコートパネルに取り付け、ボイド管内にコンクリート（母材コンクリート種別：24-18-20-H）を流し込んで作製した。得られたコンクリート母材について、材齢1カ月以上経過後、穿孔深さがアンカー筋径の5倍となるよう、湿式コアドリルを用いて穿孔を行った。試験体の作製は、専用水をカートリッジ内で所定時間混合攪拌したアンカー材を穿孔内に注入し、直ちに全ネジのM12を垂直に挿入し定着させた。試験体図を図4-2-1に示す。試験に用いたアンカー筋と穿孔径、穿孔深さを表4-2-1に示す。アンカー筋は、引張試験において鉄筋降伏を発生させないために高強度鉄筋（種類：SNB7）を使用し、埋込み長さは鉄筋径の5倍とした。

(2) クリープ試験前引張強度試験

アンカー筋を定着させた後は、試験体を室温で養生し、アンカー定着後55日でアンカー筋の引張強度試験を行った。測定は、引抜き耐力とアンカー筋の拔出し量とした。破壊形

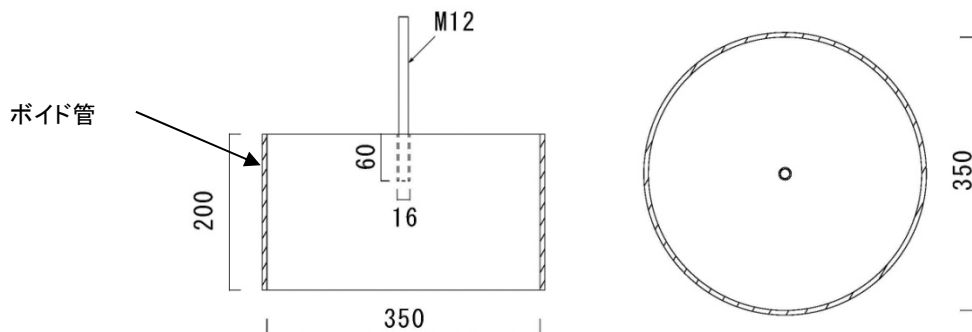


図 4-2-1 試験体図

態としてコーン状破壊を想定し、内径240mm（穿孔深さの4倍）の反力板を使用した（図4-2-2）。また、試験体数は3体とした。引張試験装置を図4-2-3及び写真4-2-1に示す。

表 4-2-1 アンカー筋径, 種類と穿孔径, 穿孔深さ

| アンカー筋 | | | 穿孔 | |
|-------|------|------------------------------|-----------|------------|
| 径 | 種類 | 降伏耐力 (N/mm ²) | 径 (mm) | 深さ (mm) |
| M12 | SNB7 | 1034 | 16 | 60 |

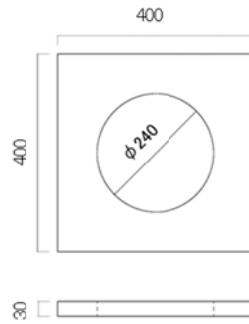


図 4-2-2 反力板形状

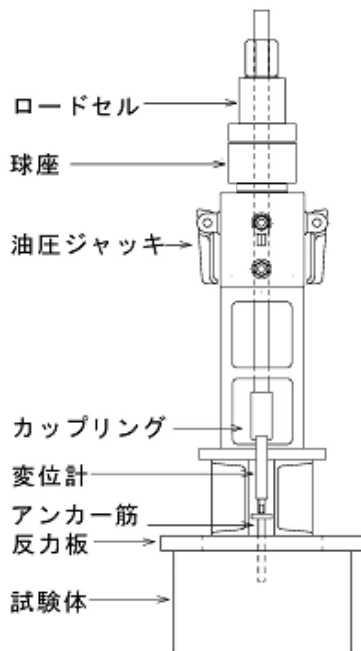


図 4-2-3 引張試験装置図



写真 4-2-1 引張試験状況

(3) クリープ試験装置

本研究で製作したクリープ試験装置を図4-2-4に示す。比較として、平成20～22年度の建築基準整備促進事業（基整促）で使用された試験装置を示す。クリープ試験装置の支柱の径はφ25mm（種類：SUJ2）を、テンションバーは、M30の全ネジ（種類：SNB7）を用いた。

製作したクリープ試験装置の特徴を次に示す。

- 1) クリープ破壊試験が可能な構造
- 2) ばね台座へのリニアブッシュの取り付け
(ばね台座の動きを円滑化および加力時のばね台座の傾き防止)
- 3) シャフト下部のばね台座補助パイプの取り付け
(クリープ破壊時の装置への衝撃緩和および載荷作業性の向上)
- 4) 試験体のL型クランプによる固定
(加力時の試験体のずれ防止による変位測定精度向上)
- 5) 載荷端の変位測定箇所を増設
(載荷端の4点測定による変位測定精度向上)

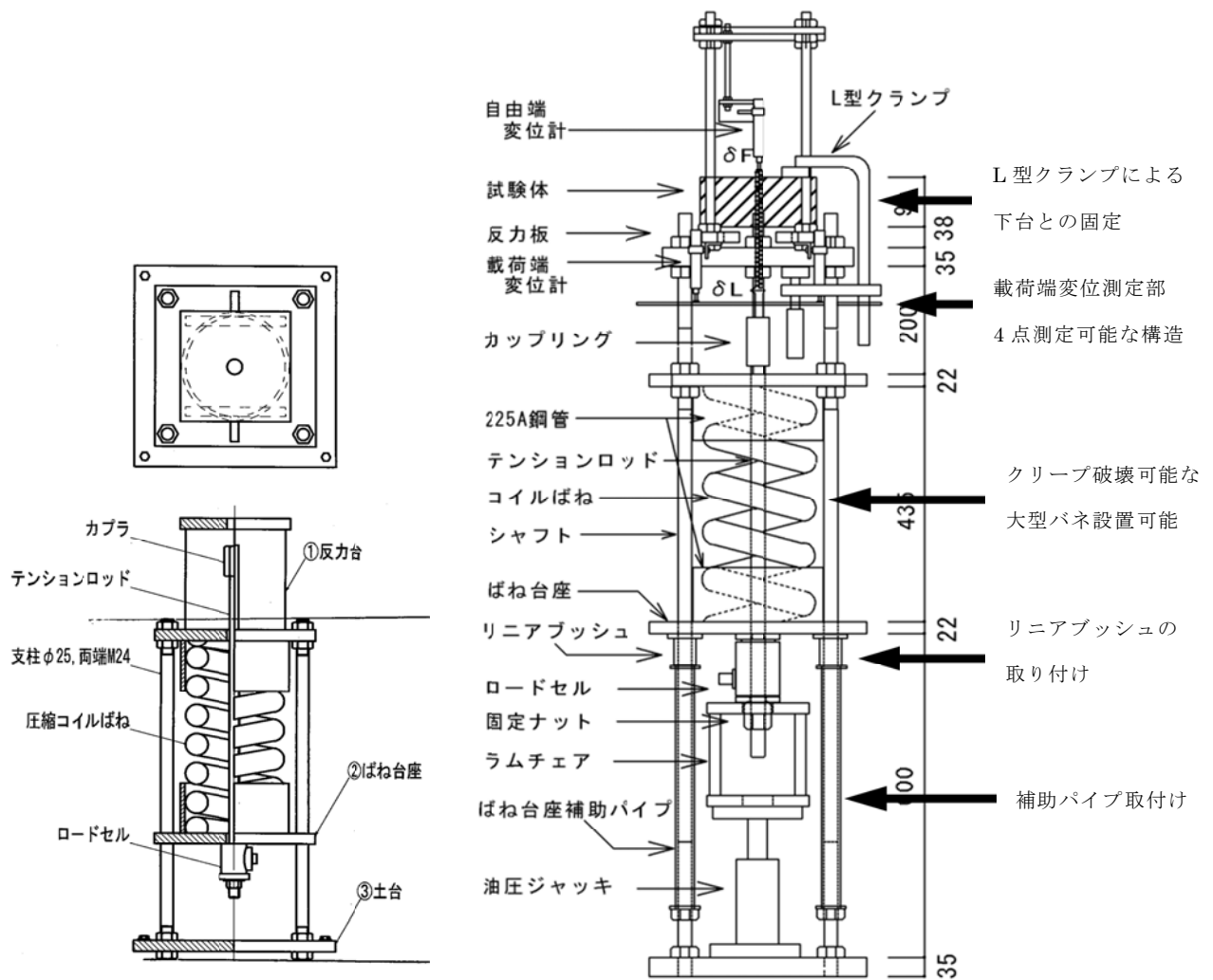
クリープ試験に使用したコイルばねの仕様を表4-2-3に示す。使用したばねは、付着強度試験時の最大引張耐力と同程度の載荷が可能なコイルばねとした。建築基準整備促進事業（基整促）において用いられたバネの最大荷重は約80kNであるのに対し、本研究において使用したバネの最大荷重は約135kNのものとした。

(4) クリープ試験方法

クリープ試験において使用した反力板は、付着強度試験と同様のものを用い、長期持続載荷によるアンカー筋の拔出し量の測定を行った。クリープ試験は、引張強度試験終了後に実施した。試験環境は20±2℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿の室内とした。クリープ試験

表 4-2-3 コイルばね仕様

| | 本研究 | 20～22年基整促 |
|----------------------------|----------------------|----------------------|
| コイル径 (mm) | φ 45 | φ 40 |
| コイル中心径 (mm) | φ 170 | φ 145 |
| コイル長さ (mm) | 430 | 350 |
| 有効巻数 | 7.5 | 5.5 |
| 総巻数 | 7.5 | 7.5 |
| ばね定数 (N/mm) | 1489 | 1500 |
| 横弾性係数 (N/mm ²) | 7.85×10 ⁴ | 7.85×10 ⁴ |
| 80%たわみ荷重 (kN) | 135 | 83 |



平成 20～22 年建築基準整備促進事業
で使用された試験装置

本研究において製作した試験装置

図 4-2-4 試験装置比較図

装置の検証において、変位測定箇所は引張強度試験時と同じ高さであるコンクリート表面より130mm高さの点とした。クリープ試験装置への試験体設置状況を図4-2-5、写真4-2-2に示す。

試験体への長期持続荷重の導入は以下の方法で行った。試験体を装置上部に設置した後、装置下部の油圧ジャッキにより、ラムチェアを介してばね台座を押し上げ、コイルばねに圧縮力を与えた。コイルばねに圧縮力を与えた状態で、テンションロッド下部の固定ナットによりばね台座を固定し、油圧ジャッキを除荷することにより、試験体に引張力を導入した。

クリープ試験は、はじめに予備荷重として、引張強度試験で得られた最大耐力の1/3荷重まで5kN毎に荷重と変位を測定し、これを3回繰返した。その後、目標荷重への加力開始前

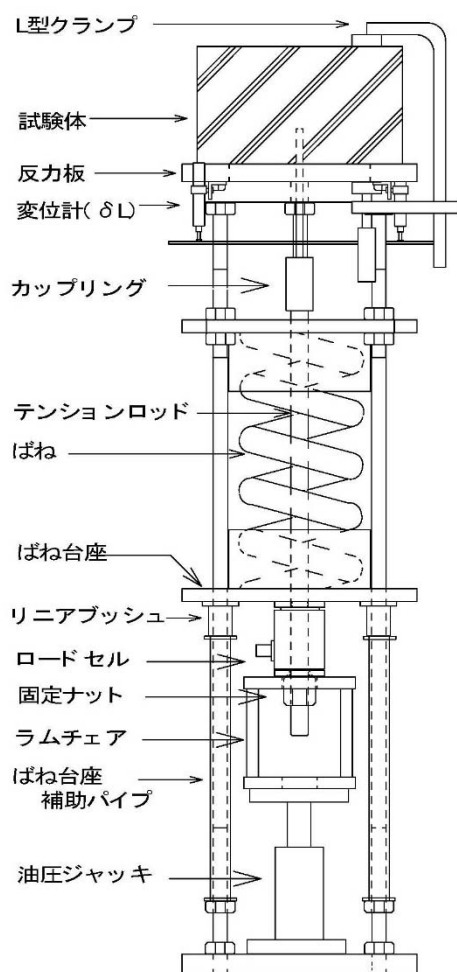


図 4-2-5 長期載荷試験装置図



写真 4-2-2 長期載荷試験装置

に変位を0に調整し、目標荷重まで5kN毎に荷重と変位を測定した。なお、目標荷重に到達後、荷重の調整は実施しなかった。

クリープ試験の載荷荷重 (N_{sust}) は、クリープ試験前の引張強度試験の結果から得られた最大荷重 (P_{max}) の55%とした。載荷期間は3か月とし、3か月後に除荷を行い、除荷後も変位の測定を継続し、回復クリープの測定を7日間行った。

(5) クリープ試験終了後の引張強度試験

クリープ試験後の試験体について、4章2節2項(2)と同様の方法で引張強度試験を行った。また、クリープ試験と同期間、同じ環境条件で載荷を行わずに保管しておいた試験体についても同時に引張強度試験を行った。

4. 2. 3 試験結果

(1) コンクリートおよびアンカー材の圧縮強度試験

試験に用いたコンクリート母材およびアンカー材について、クリープ試験前後の圧縮強度 σ_B および静弾性係数 E_C を表4-2-4に示す。

コンクリートの強度は42.9N/mm²、アンカー材の強度は70.9N/mm²であり、アンカー材の強度は、母材コンクリートに比べ、1.65倍高いものであった。

(2) クリープ試験前引張強度試験

クリープ試験の載荷荷重を決定するための引張強度試験結果を表4-2-5に、引張強度試験時の荷重-変位曲線を図4-2-6に示す。また、引張試験後の試験体の一例を写真4-2-3に示す。3試験体の最大平均耐力 P_{max} は48.8kNであった。破壊形態は3試験体ともに同様で、アンカー筋から外周方向へ放射状の亀裂が入り、コンクリートが破壊し始めた後にアンカー筋の拔出しが生じた。変位挙動は、30kN程度までは、荷重変位は直線的に増加し、その後、徐々に荷重増加量に対する変位増加量は大きくなる傾向となった。最大耐力に達した後は、緩やかに荷重は低下した。

表 4-2-4 コンクリート母材およびアンカー材の圧縮試験データ

| 試験体 | クリープ試験開始時 | | | | クリープ試験終了時 | | | |
|--------|------------------------------|------|--------------------------------|------|------------------------------|------|--------------------------------|------|
| | 圧縮強度 (N/mm ²) | | 静弾性係数 (kN/mm ²) | | 圧縮強度 (N/mm ²) | | 静弾性係数 (kN/mm ²) | |
| | σ_B | Avg. | E_C | Avg. | σ_B | Avg. | E_C | Avg. |
| コンクリート | 43.1 | 42.9 | 31.0 | 32.2 | 45.5 | 46.3 | 34.0 | 33.3 |
| | 43.4 | | 32.4 | | 46.7 | | 33.7 | |
| | 42.4 | | 33.1 | | 46.8 | | 32.3 | |
| アンカー材 | 73.1 | 70.9 | 25.9 | 25.4 | 65.0 | 67.0 | 25.5 | 26.5 |
| | 68.7 | | 24.9 | | 65.7 | | 26.9 | |
| | —* | | —* | | 70.4 | | 26.9 | |

*: 準備試験時のアンカー材の強度について、3本中1本が載荷面の不良と推測される異常な破壊形態を示したため、データを除外し、2本測定の平均値を採用した。

表 4-2-5 クリープ試験前引張強度試験

| 試験体 | 最大耐力 P_{max} 時 | | | | 最大荷重 P_{max} の 55% 荷重時 | | | |
|------|------------------|------|--------|------|---|------|--------|------|
| | 最大耐力(kN) | | 変位(mm) | | $0.55 \times P_{max}$ (N_{sust}) (kN) | | 変位(mm) | |
| | | Avg. | | Avg. | | Avg. | | Avg. |
| No.1 | 52.0 | 48.8 | 0.77 | 0.72 | 28.6 | 26.9 | 0.27 | 0.29 |
| No.2 | 46.2 | | 0.63 | | 25.4 | | 0.29 | |
| No.3 | 48.3 | | 0.76 | | 26.6 | | 0.33 | |

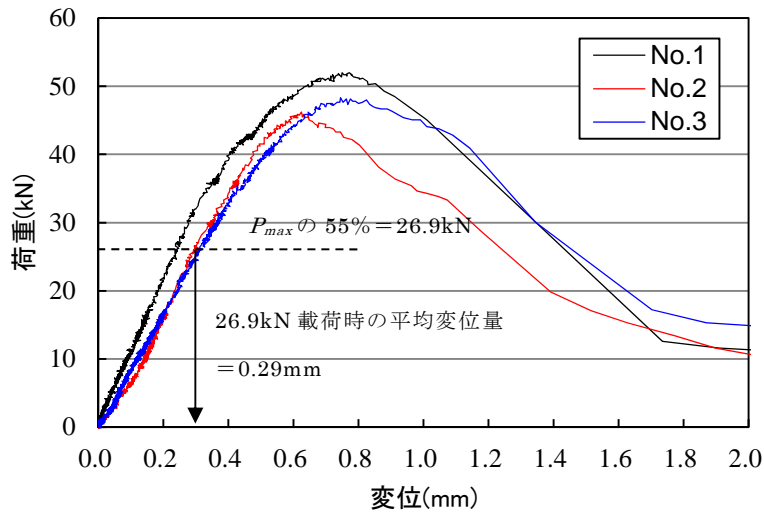


図 4-2-6 クリープ試験前引張強度試験時の荷重－変位曲線



写真 4-2-3 クリープ試験前引張強度試験時の破壊状況

この引張強度試験結果より、クリープ載荷荷重は、最大耐力の平均値 P_{max} の55%荷重である26.9kNとした。最大耐力の55%荷重時の平均変位は、荷重－変位曲線より0.29mmであった。

(3) 予備載荷における変位挙動

クリープ試験開始前に予備載荷試験として、引張強度試験の最大耐力の1/3荷重までを繰返し載荷し、5kN毎に変位の測定を実施した。図4-2-7に予備載荷試験での繰返し載荷時の荷重変位の関係を示す。

1回目の載荷における荷重－変位曲線は、載荷初期に大きな変位の増加を示す試験体があった。2回目以降の荷重－変位曲線の傾きは、予備載荷1回目に比べて、すべての試験体で、荷重－変位曲線の傾きに直線性が認められ、3回目もほぼ2回目と同等の傾きとなった。

予備載荷1回目の終了後の除荷時（荷重=0kN）の変位が、0mmより大きな値となった試験体は、予備載荷2回目以降の除荷時の変位と1回目の除荷時の変位が0mmより大き

な値で概ね一定の値を示した。これは、試験体と反力板等の接触面でのなじみが向上したことが考えられる。

また、予備載荷 2 回目以降の荷重変位の傾きは、引張強度試験時の傾きとほぼ同等であった。これらのことから、クリープ試験を開始する前に 3 回程度の載荷と除荷を繰り返すことにより、目標載荷荷重到達時の変位値が安定することが判明した。

(4) クリープ変位曲線

クリープ試験開始時の変位と引張強度試験時の荷重－変位曲線の比較を図4-2-8に、クリープ試験時の荷重変位の関係を図4-2-9に示す。引張強度試験時とクリープ試験時の荷重－変位曲線の傾きは概ね一致した。しかし、引張強度試験時の荷重－変位曲線の傾きは、試験体により若干のバラツキがあり、クリープ試験時と引張強度試験時の差は、試験体の個体差によるものが考えられる。

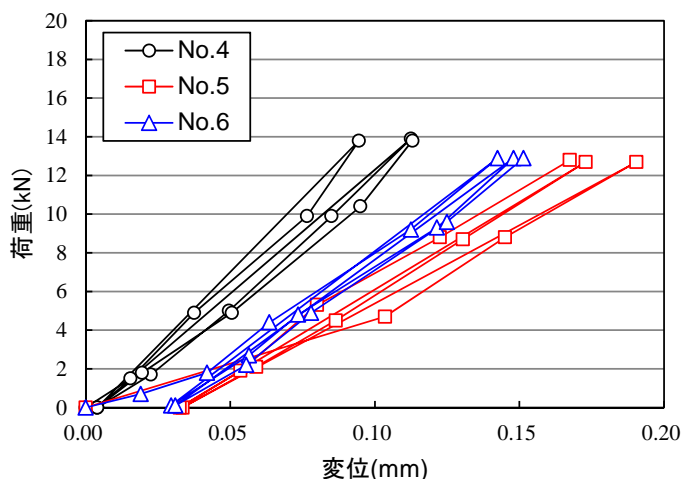


図 4-2-7 予備載荷試験時の荷重－変位曲線

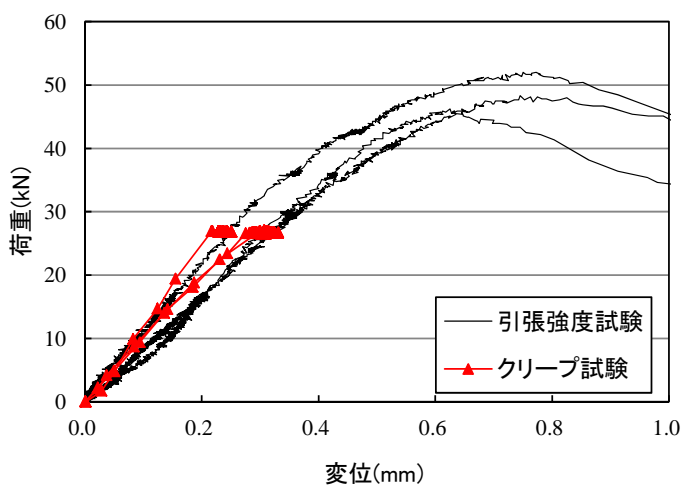


図 4-2-8 クリープ試験開始時とクリープ試験前引張強度試験時の荷重－変位曲線

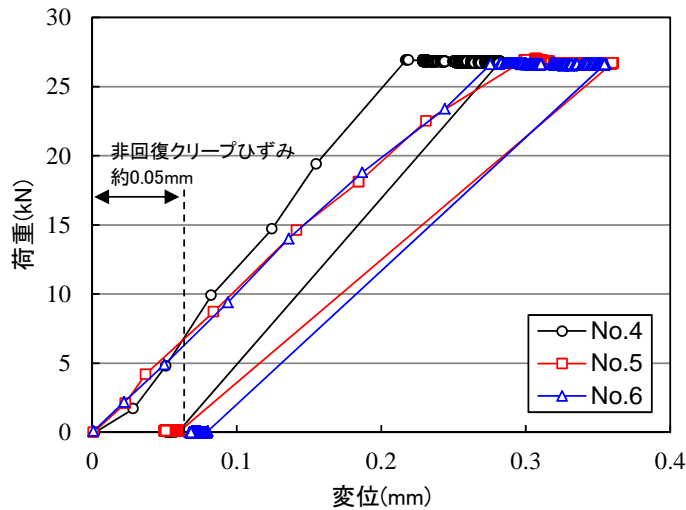


図 4-2-9 クリープ試験時の荷重変位の関係

図4-2-9より、3試験体ともほぼ目標設定荷重値へ載荷可能であり、目標の載荷荷重に対する誤差は、0.2kN程度であることを確認した。また、30kN程度で90日の持続荷重では、載荷荷重の低下はほとんどなく、所定の載荷荷重の±2%以下の精度での載荷が可能であることを確認した。

クリープ曲線を図4-2-10~図4-2-12に示す。図4-2-10は、変位の初期値を載荷0kN時からの値とし、図4-2-11は、目標載荷到達直後の変位の値を0mmとしたものに、引張強度試験時の荷重-変位曲線の載荷荷重時の変位の平均値を加えたものとした。また、図4-2-12は、図4-2-11の時間軸を対数軸としたものとした。

図 4-2-10 より、載荷荷重到達後の変位に差を生じたが、長期載荷試験後の非回復クリープひずみは、3 試験体ともに約 0.05mm でほぼ同等であった。また、図 4-2-11 より、載荷開始（載荷材齢 0 日）から載荷終了までのアンカー筋の試験体からの拔出し変位量は 0.05mm 程度であり、3 試験体においてほとんど変位に差は認められなかった。

これらのことから、本試験装置では、非回復クリープひずみとクリープひずみがほぼ同等であり、非回復クリープひずみの測定も可能であることを確認した。

クリープ試験の載荷において、目標載荷荷重到達時の変位にばらつきが生じた。引張強度試験においても、荷重-変位曲線の試験体ごとの変位の差は大きく、クリープ試験においても、同様の傾向であった。目標荷重到達後の長期載荷時の変位挙動では、試験体による差はほとんど認められないことから、クリープ試験を行う場合は、目標載荷到達直後の変位の値を0mmとしたものに、引張強度試験時の荷重-変位曲線のクリープ載荷荷重に相当する変位を加えた変位を全ひずみとして評価の方が好ましいと考えられる。

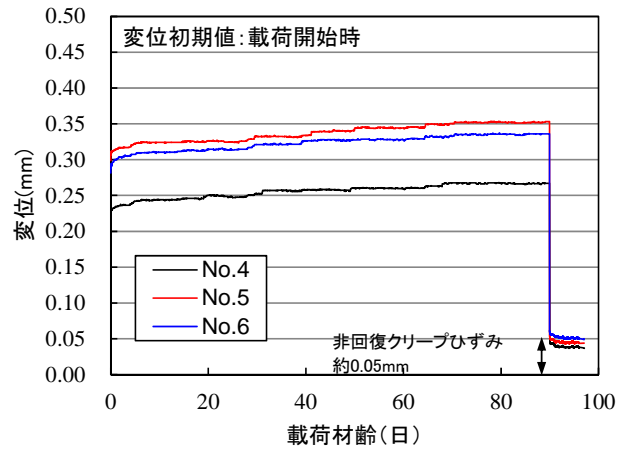


図 4-2-10 クリープ変位曲線

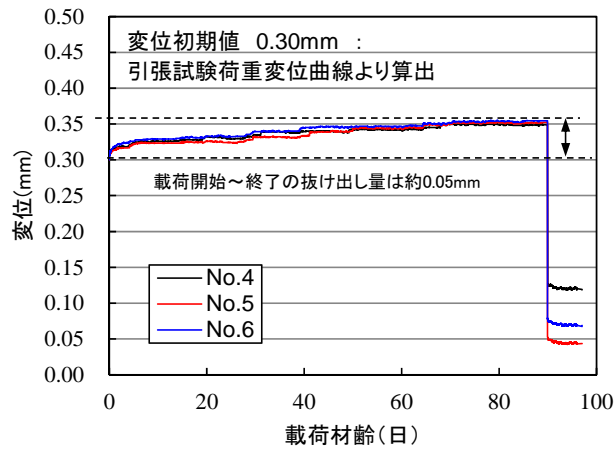


図 4-2-11 クリープ変位曲線

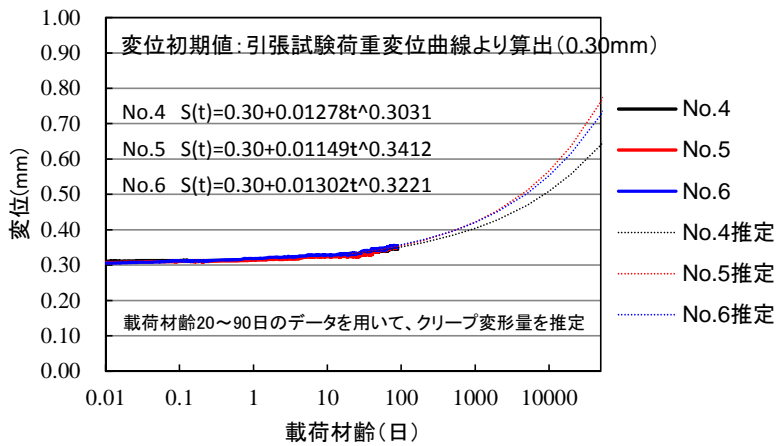


図 4-2-12 クリープ試験時の荷重変位の関係

長期的なクリープ変形量を推定するため、EOTA ETAG 001 Part5[4-2]（以下、ETAG基準と記す）に従い、式（4-1）の定数 a 、 b を試験結果の最終20日間以上のデータである載荷開始から20日以降の値より算出した。今回のクリープ試験においては、載荷が完了した瞬間の変位量を $S(0)$ と仮定し、載荷後の変位量に $S(0)$ を足した値をトータルの変位量 $S(t)$ とした。

$$S(t) = S(0) + a \cdot t^b \quad \text{式 (4-1)}$$

t : クリープ開始後の時間
 a, b : 実験によって求める定数

以下に、推定式を3試験体それぞれの算出式を示す。

$$\text{No.4 : } S(t) = 0.30 + 0.01278 \cdot t^{0.3031}$$

$$\text{No.5 : } S(t) = 0.30 + 0.01149 \cdot t^{0.3412}$$

$$\text{No.6 : } S(t) = 0.30 + 0.01302 \cdot t^{0.3221}$$

ここで、 $S(0)$ は、クリープ試験後の引張強度試験におけるクリープ載荷荷重の平均変位を用いた（表4-2-7）。

表4-2-5に推定式から載荷期間50年および100年における推定変位を示した。載荷材齢90日までの変位挙動はほとんど差が認められないものの、推定式では50年における変位で、0.55~0.63となり、0.08mmの差が生じた。

測定したクリープ曲線では、ほぼ同一であるものの、50年後の推定では、0.08mmの差が生じており、ごくわずかなクリープ変位の測定の誤差でも、長期の変位推定では、大きな影響を与えることが判明した。

表 4-2-5 55%荷重における長期における変位推定値

| 試験体番号 | $S(t)$ | | | |
|-------|--------|------|--------|------|
| | 50年 | | 100年 | |
| | 変位(mm) | | 変位(mm) | |
| | | Avg. | | Avg. |
| No.4 | 0.55 | 0.60 | 0.61 | 0.67 |
| No.5 | 0.63 | | 0.71 | |
| No.6 | 0.61 | | 0.69 | |

(5) クリープ試験後の引張強度

クリープ試験後の長期持続荷重による耐力低下の有無を確認するため、クリープ試験前の引張強度試験と同様の方法で試験を実施した。

引張強度試験結果を表4-2-6,表4-2-7に示す。クリープ試験と同期間、同じ環境条件で載荷を行わずに保管しておいた試験体（比較試験体）の最大耐力の平均値 P_{adh} は58.9kN、クリープ試験後の試験体の最大耐力の平均値 P_{90d} は61.6kNであった。破壊形態はいずれもクリープ試験前と同様に、反力板の内側にアンカー筋を中心とした放射状の亀裂が入り、コンクリートが破壊し始めた後にアンカー筋の抜け出しが生じた。

クリープ試験後の試験体では、強度のばらつきは大きいものの、平均値で61.6kNであり、引張強度は、比較試験体と同等もしくは若干増加し、55%荷重の長期載荷による強度低下は確認されなかった。

比較試験体の最大荷重 P_{adh} の55%荷重は32.4kNであり、この時の変位量は0.34mmであった。また、クリープ試験の載荷荷重 N_{sust} である26.9kN時の比較試験体の変位量 $S(0)$ は0.30mmであった。

比較試験体の最大耐力は、クリープ試験前の強度より1.2倍程度大きな荷重値となった。これは、クリープ試験期間が3カ月であり、材齢経過によるコンクリート強度が増進し、引張強度が向上したものと考えられる。

アンカーの付着強度は、母材コンクリート強度の影響を受けるため、アンカーのクリー

表 4-2-6 クリープ試験後の引張強度

| 試験体 | 試験体 番号 | 最大荷重時 | | | | 最大荷重 P_{max} の 55% 荷重時 | | | |
|------------|-----------|----------------|------|---------|------|----------------------------|------|---------|------|
| | | P_{max} (kN) | | 変位量(mm) | | $0.55 \times P_{max}$ (kN) | | 変位量(mm) | |
| | | N_{90d} | Avg. | | Avg. | | Avg. | | Avg. |
| 長期載荷 試験 | No.4 | 63.6 | 61.6 | 0.68 | 0.75 | 35.0 | 33.9 | 0.24 | 0.31 |
| | No.5 | 65.2 | | 1.17 | | 35.9 | | 0.49 | |
| | No.6 | 55.9 | | 0.41 | | 30.7 | | 0.19 | |

表 4-2-7 比較試験体の引張強度

| 試験体 | 試験体 番号 | 最大荷重時 | | | | N_{sust} 時 | | | 最大荷重 P_{max} の 55% 荷重時 | | | |
|-----------|-----------|----------------|------|-----------|------|--------------------|---------|------|----------------------------|------|---------|------|
| | | P_{max} (kN) | | 変位量(mm) | | N_{sust} (kN) | 変位量(mm) | | $0.55 \times P_{max}$ (kN) | | 変位量(mm) | |
| | | P_{adh} | Avg. | S_{adh} | Avg. | | $S(0)$ | Avg. | | Avg. | | Avg. |
| 比較 試験体 | No.7 | 60.4 | 58.9 | 0.80 | 0.81 | 26.9 | 0.28 | 0.30 | 33.2 | 32.4 | 0.33 | 0.34 |
| | No.8 | 63.1 | | 0.85 | | | 0.25 | | 34.7 | | 0.29 | |
| | No.9 | 53.3 | | 0.77 | | | 0.37 | | 29.3 | | 0.41 | |

プ挙動においても、コンクリート強度の影響を受けることが推測される。そのため、コンクリート強度の増進にともないクリープ挙動も変化することが考えられるため、クリープ試験における母材コンクリートは、材齢が数か月以上経過したものの方が好ましいと考えられる。

4.2.4 まとめ

製作したクリープ試験装置について、試験装置の評価を行った。

- 1) 製作したクリープ試験装置は、荷重開始時 (0kN) からの変位測定、目標荷重値の荷重が可能である事を確認した。
- 2) 目標の荷重荷重に対して、製作したクリープ試験装置では、0.2kN程度の誤差で荷重が可能であり、30kN程度で90日の持続荷重では、荷重の低下はほとんどなく、所定の荷重荷重の±2%以下の精度での荷重可能であり、装置による差がないことを確認した。
- 3) 荷重開始前から荷重試験到達時までの荷重-変位曲線は引張強度試験とほぼ同等の荷重-変位曲線となり、非回復クリープとクリープ変位がほぼ同等であり装置の精度としても問題がないことを確認した。
- 4) 製作した試験装置は、荷重開始からの変位挙動から回復クリープの測定まで可能であることを確認した。
- 5) クリープひずみは、付着強度試験における荷重-変位曲線に目標荷重到達後からの変位を加えたものが好ましいことが判明した。

4.3 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの長期持続荷重に関する評価

4章2節で検証を行ったクリープ試験装置を用い、母材コンクリート強度、鉄筋、拘束方法がクリープに及ぼす影響を調べ、超速硬セメント系注入式あと施工アンカーと有機系注入式あと施工アンカーとの比較を行い、長期持続荷重に対する耐久性の評価を行った。

4.3.1 コンクリート強度が先付けアンカーおよびあと施工アンカーに

及ぼす影響に関する検討

(1) 目的

無機系あと施工アンカー（超速硬セメント系注入式あと施工アンカー）および先付けアンカーを用いて引張クリープ試験を実施し、コンクリート強度によるクリープ挙動の比較検討を行い、コンクリート強度が超速硬セメント系注入式あと施工アンカーおよび先付けアンカーのクリープ挙動に及ぼす影響の把握を目的とした。

(2) 実験概要

①使用材料および試験体の作製方法

実験には、超速硬セメント系注入式あと施工アンカー（InB）と先付けアンカー（CIP）を使用し、母材コンクリート強度は、3水準とした。使用した注入式あと施工アンカーは、第3章で物性を確認した超速硬セメント系注入式あと施工アンカーを使用した。使用したアンカー材の成分と物性を表4-3-1に示す。

クリープ載荷荷重決定のためのアンカーの付着強度試験、クリープ試験に用いた母材コンクリートおよびアンカー筋の物性値を表4-3-2に示す。母材コンクリートの物性試験はJIS A1108に準拠し、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体を用い、付着強度試験実施と同時に測定を行った。コンクリート強度は、 24.3N/mm^2 、 46.2N/mm^2 、 78.1N/mm^2 の3種類を使用した。付着強度試験およびクリープ試験に用いた試験体形状を図4-3-1に示す。

試験体は、載荷時のコンクリートの割裂防止のため、鋼管（外径216mm、厚さ4.5mm）の内部にコンクリートを打設し、付着強度試験およびクリープ試験時の載荷面が型枠面となるようにした。先付けアンカーは、アンカー筋が載荷面に対して垂直になるように型枠面と打設面の2か所でアンカー筋を固定した（写真4-3-1）。クリープ試験開始時の母材コンクリートの材齢は、3か月以上とした。

表 4-3-1 アンカー材の物性

| 記号 | アンカー種類 | 主成分 | 骨材 | 水結合材比 | 圧縮強度 (N/mm^2) | 静弾性係数 (kN/mm^2) |
|-----|---------|---------|----|-------|-----------------------------|-------------------------------|
| InB | 無機系アンカー | 超速硬セメント | 珪砂 | 0.41 | 62.4 | 25 |

表 4-3-2 試験に使用したコンクリートとアンカー筋の物性

| 記号 | アンカー種類 | コンクリート | | | アンカー筋 | | | |
|-------|---------|------------------------------|--------------------------------|--|-------|-------|------------------------------|--------------------------------|
| | | 圧縮強度 (N/mm ²) | 静弾性係数 (kN/mm ²) | 引張強度 ¹⁾ (N/mm ²) | 径 | 種類 | 降伏強度 (N/mm ²) | 静弾性係数 (kN/mm ²) |
| CIP24 | 先付けアンカー | 24.3 | 28.4 | 1.9 | D13 | MK785 | 791 | 190 |
| InB24 | 無機系アンカー | | | | | | | |
| CIP46 | 先付けアンカー | 46.2 | 34.9 | 3.0 | | | | |
| InB46 | 無機系アンカー | | | | | | | |
| CIP78 | 先付けアンカー | 78.1 | 38.7 | 4.2 | | | | |
| InB78 | 無機系アンカー | | | | | | | |

1) 次式からの推定値 $f_t=0.23f_c^{2/3}$

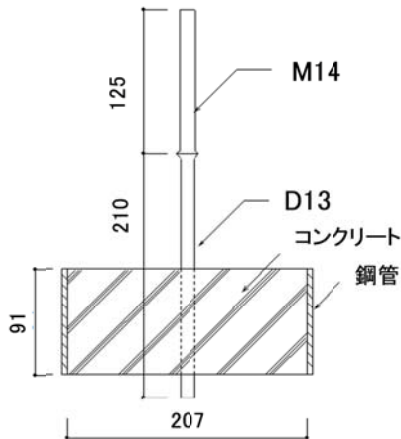


図4-3-1 試験体

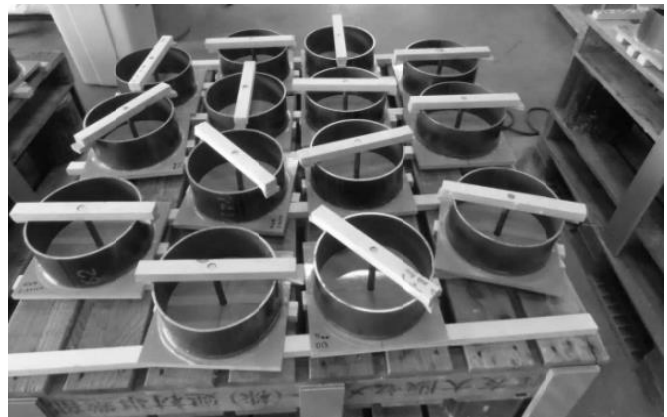


写真4-3-1 先付けアンカーの試験体作製状況

アンカー筋は、D13の高強度鉄筋を使用し、テンションロッドを接続するために全ねじM14（種類SNB7：降伏強度725N/mm²）をフラッシュバット溶接でアンカー筋と接合した。アンカー筋の埋込み長さは、付着強度試験時に鉄筋降伏が発生しないと推定される $7d_a$ （ d_a ：アンカー筋の呼び径）とした。

あと施工アンカーの穿孔には湿式コアドリルを使用し、穿孔はφ18mmで行った。穿孔時は、コアドリル専用スタンドを使用し、試験体表面に対し垂直に穿孔を行った。試験体にアンカー筋を貫通させるため、穿孔した試験体の底面の中央部分にφ16×13mmの穴を開けた型枠板を設置し、下向き施工により試験体にアンカー筋を貫通させて定着させた。アンカー施工28日後に型枠板を取り外し、突出部のアンカー筋に付着したアンカー材を取り除いた。付着強度試験は、アンカー施工28日以上経過した後に行い、その後にクリープ試験を開始した。

②付着強度試験

加力測定装置図を図4-3-2に示す。付着破壊を起こさせるために反力板（図4-3-3）を試験体の上に設置し、反力板の上にラムチェア、センターホールジャッキおよび球座を設置し、センターホールジャッキにより試験体に引張力を導入した。反力板の口径は穿孔径の1.5-2.0倍の範囲内の $\phi 30\text{mm}$ とし、測定項目は荷重、自由端（図4-3-2の δF ）のアンカー筋の拔出し量とした。

③クリープ試験方法

クリープ試験は、付着強度試験終了後に実施した。試験環境は $20\pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60\pm 5\%$ の恒温恒湿の室内とした。クリープ試験装置を図4-3-4、図4-3-5、写真4-3-2に示す。クリープ試験においても、付着強度試験と同様の反力板（図4-3-3）を使用して、長期持続載荷によるアンカー筋の拔出し量の測定を行った。

変位計の取り付けは、変位測定の基準面がコンクリート表面となるように、反力板の側面にプレートを取り付け、プレート部より変位計の取り付け可能な構造とした（図4-3-3、図4-3-5）。

試験体への加力の導入は、4章2節2項と同様とした。クリープ試験条件を表4-3-3に示す。長期持続荷重による影響を確認するため、載荷荷重は付着強度試験の最大耐力時の平均値の0.33~0.95の範囲とし、試験体数は設定荷重毎に1体とした。

測定項目は、付着強度試験と同様の荷重、自由端（図4-3-4、図4-3-5の δF ）のアンカー筋の拔出し量とした。

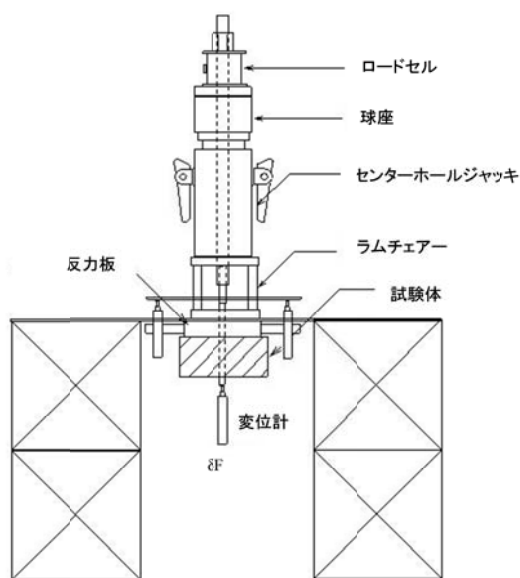


図4-3-2 付着試験装置

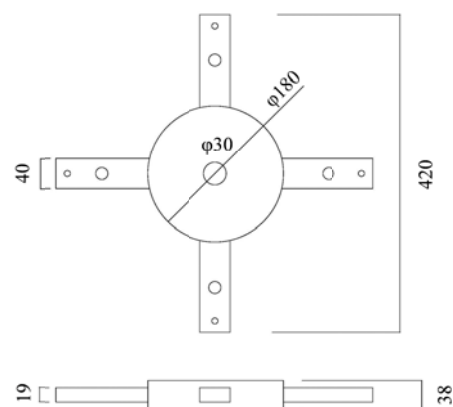


図4-3-3 反力板

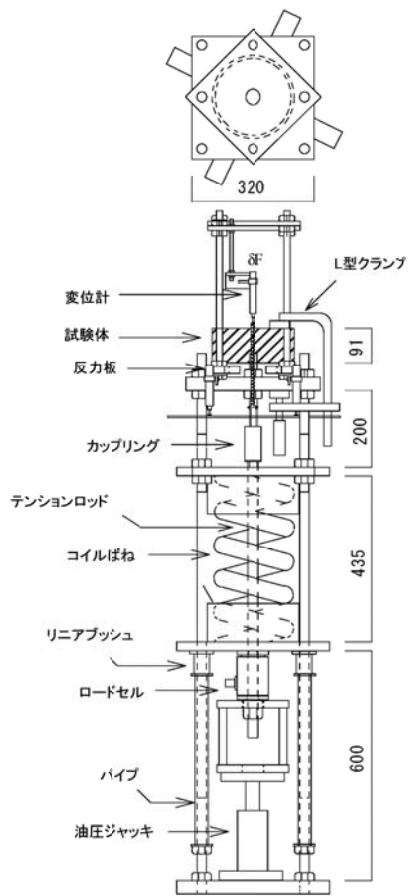


図4-3-4 クリープ試験装置



写真4-3-2 クリープ試験状況

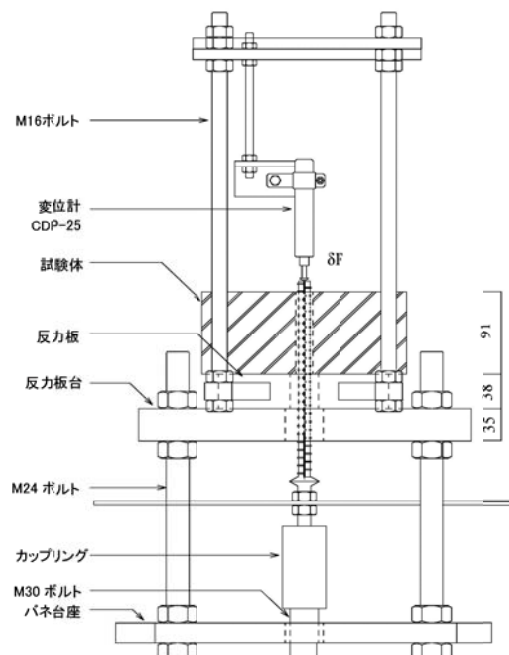


図4-3-5 変位測定点

表 4-3-3 クリープ試験条件

| 試験体 | アンカー種類 | 載荷荷重 (kN) | 載荷荷重比 (載荷荷重/最大耐力) |
|------------|---------|--------------|----------------------|
| CIP24-0.33 | 先付けアンカー | 15.2 | 0.33 |
| CIP24-0.65 | | 29.8 | 0.65 |
| CIP24-0.69 | | 31.7 | 0.69 |
| CIP24-0.86 | | 39.8 | 0.86 |
| CIP46-0.30 | 先付けアンカー | 15.3 | 0.30 |
| CIP46-0.61 | | 30.9 | 0.61 |
| CIP78-0.64 | 先付けアンカー | 73.7 | 0.64 |
| InB24-0.32 | 無機系アンカー | 29.9 | 0.32 |
| InB24-0.63 | | 58.7 | 0.63 |
| InB24-0.79 | | 73.5 | 0.79 |
| InB24-0.90 | | 83.7 | 0.90 |
| InB24-0.93 | | 87.1 | 0.93 |
| InB24-0.95 | | 89.0 | 0.95 |
| InB46-0.26 | 無機系アンカー | 30.9 | 0.26 |
| InB46-0.63 | | 74.9 | 0.63 |
| InB46-0.91 | | 107.4 | 0.91 |
| InB78-0.60 | 無機系アンカー | 75.0 | 0.60 |

(3) 試験結果および考察

① 付着強度試験

表4-3-4, 図4-3-6に付着強度試験結果を示す。付着強度 (τ_{bl}) は, 最大耐力をアンカー筋の公称直径 (d_{al}) と埋込み長さ (l_b) より算出したアンカー筋の表面積で除した値とした。付着強度 τ_{bl} の平均値は, CIP24 (先付けアンカー コンクリート強度24N/mm²) が 12.7N/mm², InB24 (無機系注入式あと施工アンカー コンクリート強度24N/mm²) が 22.6N/mm²で, CIP46 (先付けアンカー コンクリート強度46N/mm²) が13.8N/mm², InB46 (無機系注入式あと施工アンカー コンクリート強度46N/mm²) が32.6N/mm², CIP78 (先付けアンカー コンクリート強度78N/mm²) が31.6N/mm², InB78 (無機系注入式あと施工アンカー コンクリート強度78N/mm²) が34.4N/mm² であった。InB46, CIP78, InB78では鉄筋が降伏した後にアンカー筋とアンカー材料の界面での付着破壊が生じた。InB24, InB46の付着強度 τ_{bl} は, CIP24, CIP46の約2倍を示し, 破壊箇所は, すべての試験体においてアンカー筋とアンカー材料の界面での付着破壊であった。

CIP24の付着強度 τ_{bl} は, 各種合成構造設計指針・同解説[4-3]等 に示されている接着系アンカー (カプセル方式/有機系) の基本平均付着強度 ($\tau_{bavg}=10\sqrt{\sigma_B/21}$) に対して1.1~1.2倍, CIP46では, 0.9~1.0倍であった。一方InB24の付着強度 τ_{bl} は, 基本平均付着強度に対し2倍程度であった。

CIP24の最大耐力時の変位は, 0.81mmに対し, InB24の最大耐力時の変位は0.35mmであ

表 4-3-4 付着強度試験結果

| 試験体 | 径 | | 埋込み長さ (mm) l_b | 最大耐力 | | 付着強度 | | 最大耐力時の変位 | | 1/3 荷重時の割線剛性 | | |
|-------|--------------------------|------------------------|------------------------|-------------------|-------|-------------------------------------|------|--------------------|------|--------------|-----|-----|
| | アンカー (mm) d_{a1} | 穿孔 (mm) d_{a2} | | (kN) P_{max} | | (N/mm ²) τ_{bl} | | (mm) δF | | (kN/mm) | | |
| | | | | Avg. | | Avg. | | Avg. | | Avg. | | |
| CIP24 | 1 | 12.7 | - | 91 | 43.5 | 46.2 | 12.0 | 12.7 | 0.83 | 0.81 | 153 | 157 |
| | 2 | | | | 46.5 | | 12.8 | | 0.84 | | 137 | |
| | 3 | | | | 48.5 | | 13.3 | | 0.76 | | 182 | |
| InB24 | 1 | 12.7 | 18 | 91 | 102.2 | 93.5 | 28.2 | 25.7 | 0.48 | 0.35 | 568 | 483 |
| | 2 | | | | 89.0 | | 24.5 | | 0.27 | | 424 | |
| | 3 | | | | 89.2 | | 24.6 | | 0.30 | | 457 | |
| CIP46 | 1 | 12.7 | - | 91 | 47.5 | 50.3 | 13.1 | 13.8 | 0.86 | 0.86 | 158 | 201 |
| | 2 | | | | 52.8 | | 14.5 | | 0.95 | | 235 | |
| | 3 | | | | 50.6 | | 13.9 | | 0.78 | | 211 | |
| InB46 | 1 | 12.7 | 18 | 91 | 126.1 | 118.3 | 34.7 | 32.6 | 0.45 | 0.41 | 934 | 883 |
| | 2 | | | | 115.4 | | 31.8 | | 0.44 | | 770 | |
| | 3 | | | | 113.5 | | 31.3 | | 0.35 | | 946 | |
| CIP78 | 1 | 12.7 | - | 91 | 115.8 | 114.8 | 31.9 | 31.6 | 0.55 | 0.54 | 551 | 650 |
| | 2 | | | | 112.7 | | 31.0 | | 0.53 | | 626 | |
| | 3 | | | | 116.1 | | 32.0 | | 0.54 | | 774 | |
| InB78 | 1 | 12.7 | 18 | 91 | 127.4 | 124.8 | 35.1 | 34.4 | 0.99 | 0.90 | 566 | 712 |
| | 2 | | | | 125.6 | | 34.6 | | 0.72 | | 761 | |
| | 3 | | | | 121.6 | | 33.5 | | 0.99 | | 810 | |

アンカー筋の降伏点：100.4kN

り、InB24では最大耐力後、急激に耐力が低下する傾向が認められた。InB24の最大耐力の1/3荷重時の変位は、CIP24の変位の1/2程度であり、InB24の剛性は、CIP24より高いことが確認された。これは、アンカー材料の圧縮強度が、60N/mm²以上と高強度であり、この影響が表れたものと考えられる。

CIP78のコンクリートの圧縮強度は、アンカー材の圧縮強度より高いため、最大耐力はCIP78の方がInB78より高くなるものと推測していた。今回アンカー筋が降伏した後に付着破壊をしているため、付着強度は参考値となるが、CIP78の最大耐力は、InB78の方より若干小さくなった。CIP78では、アンカー筋近傍に存在する粗骨材の影響により、アンカー筋とモルタルとの付着を阻害し、最大耐力が若干小さくなったことが考えられる。

CIP、InBともに、母材コンクリート強度が高くなるに従い、最大耐力は向上した。InB24、InN46の最大耐力の1/3時の割線剛性は、CIP24、CIP46より大きく、アンカー筋降伏後に付着破壊したCIP78の1/3割線剛性は、InB78と同等であった。

InBでは、母材コンクリートとアンカー材との付着強度が十分に高く、アンカー筋とアンカー材との界面での破壊を生じた。このため、鉄筋とアンカー材の界面での付着力が最大耐力になるため、母材コンクリート強度に関係なく、アンカー材料の強度により付着強度が決定し、コンクリート強度により変化しないものと推定される。しかし、母材コンクリート強度の上昇にともない、付着強度は上昇した。この原因については、3章2節(4)

で示したように、母材コンクリート強度の違いが、孔内におけるアンカー材の膨張収縮量へ影響を及ぼすため、材料内部に発生するストレスの違いにより、付着強度に影響を与えたことが考えられる。

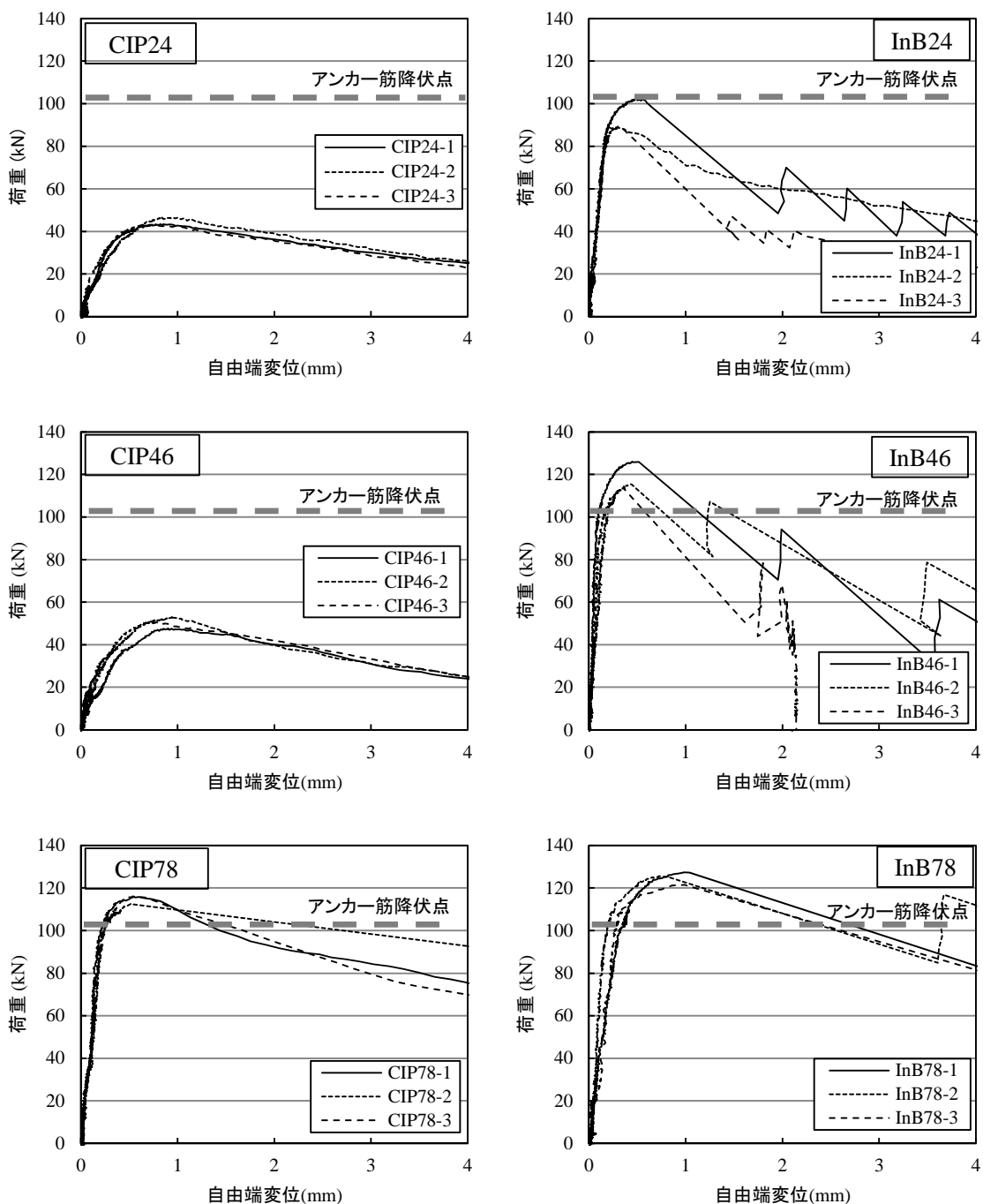


図 4-3-6 付着試験における荷重－変位曲線

②クリープ予備載荷評価

クリープ試験開始前に予備載荷試験として、付着強度試験の最大耐力の1/3荷重までを繰返し載荷し、変位を測定した。

予備載荷1回目に比べて、2回目以降の荷重-変位曲線の傾きは、大きくなり、荷重-変位曲線の傾きに直線性が認められ、3回目もほぼ同等の傾きとなった。これは、その他の試験体においても同様の傾向が認められ、4章2節3項(3)と同様の結果が得られた。

それぞれの試験体について、予備載荷2回目以降の荷重-変位曲線の傾きを荷重5kN毎の測定値より最小二乗法により算出したところ、CIP24が150~250kN/mm、CIP46が300~400kN/mm、CIP78が約1000kN/mmであり、コンクリート強度が高いほど傾きは大きくなった。InBでは、試験体により傾きにばらつきがあるものの、傾きは600~1500kN/mmであった。InBの圧縮強度は、62.4N/mm²以上であり、アンカー材の強度が高いことにより、CIP78とInBは同等の剛性を示したと考えられる。

傾きのばらつきが大きくなる原因としては、変位が非常に小さいため、試験体のコンクリート強度、アンカー材強度のばらつき、試験体作製精度、測定精度などの影響により、傾きに大きな差が生じたものと推定される。試験体作製において、穿孔は試験治具を使用し、コンクリート表面に対して垂直に穿孔を行い、アンカー筋の定着については、アンカー筋を挿入後、目視によりアンカー筋が垂直になるように定着させている。今後、どのような原因がばらつきに大きく寄与するのかを明確にする必要がある。

③クリープ変位曲線評価

図4-3-7にクリープ試験時の変位と荷重の関係を示し、図4-3-8~図4-3-10に、載荷材齢と変位の関係を示す。図4-3-9は、CIP24、InB24、InB46のクリープ変位曲線の時間軸を小さくし、図4-3-10の時間軸は対数で表している。

クリープ試験における変位の値は、目標載荷到達直後の変位の値を0mmとしたものに、付着強度試験時の荷重-変位曲線の載荷荷重時の変位の平均値を加えたものとした。

クリープ試験時の荷重と変位の関係(図4-3-7)では、変位の増加にともない載荷荷重がわずかに低下した。ACI 355.4-11[4-4]における載荷荷重は、載荷荷重比が0.55程度、載荷期間42日以上で、長期載荷荷重の試験を行うこととしている。

今回の試験において、載荷荷重比が0.65以下の試験体の載荷初期の荷重に対する載荷開始から90日までの載荷荷重の変化量は、CIP24-0.65とInB24-0.63を除き、2%以下であった。CIP24-0.65の載荷荷重変化量は2.5%とInB24-0.63は2.7%であり、今回使用したクリープ試験装置において、最大耐力の2/3程度までの試験において、載荷荷重の変動幅は、載荷期間3か月程度において、目標荷重値の3%以下であった。EOTA ETAG001 Annex A[4-5]では、長期載荷荷重における荷重変動幅を±5%としており、この値を十分満足することを確認した。

載荷荷重比(載荷荷重/最大耐力)が高いものでは、試験期間中にクリープ破壊が生じた。CIPでは載荷荷重比0.69以上、InBでは0.79以上でクリープ破壊が200日以内に確認された。

クリープ破壊した試験体の破壊箇所は、いずれもアンカー筋とアンカー材料の界面であり、付着強度試験と同様の破壊形態であった。

荷重開始から5分で破壊したInB24-0.95のクリープ破壊直前の変位は、付着強度試験時と同等の変位で破壊した。しかし、その他の荷重開始から数時間以上後に破壊した試験体では、付着強度試験の最大耐力時の変位より大きくなった（図4-3-7）。InBでは、クリー

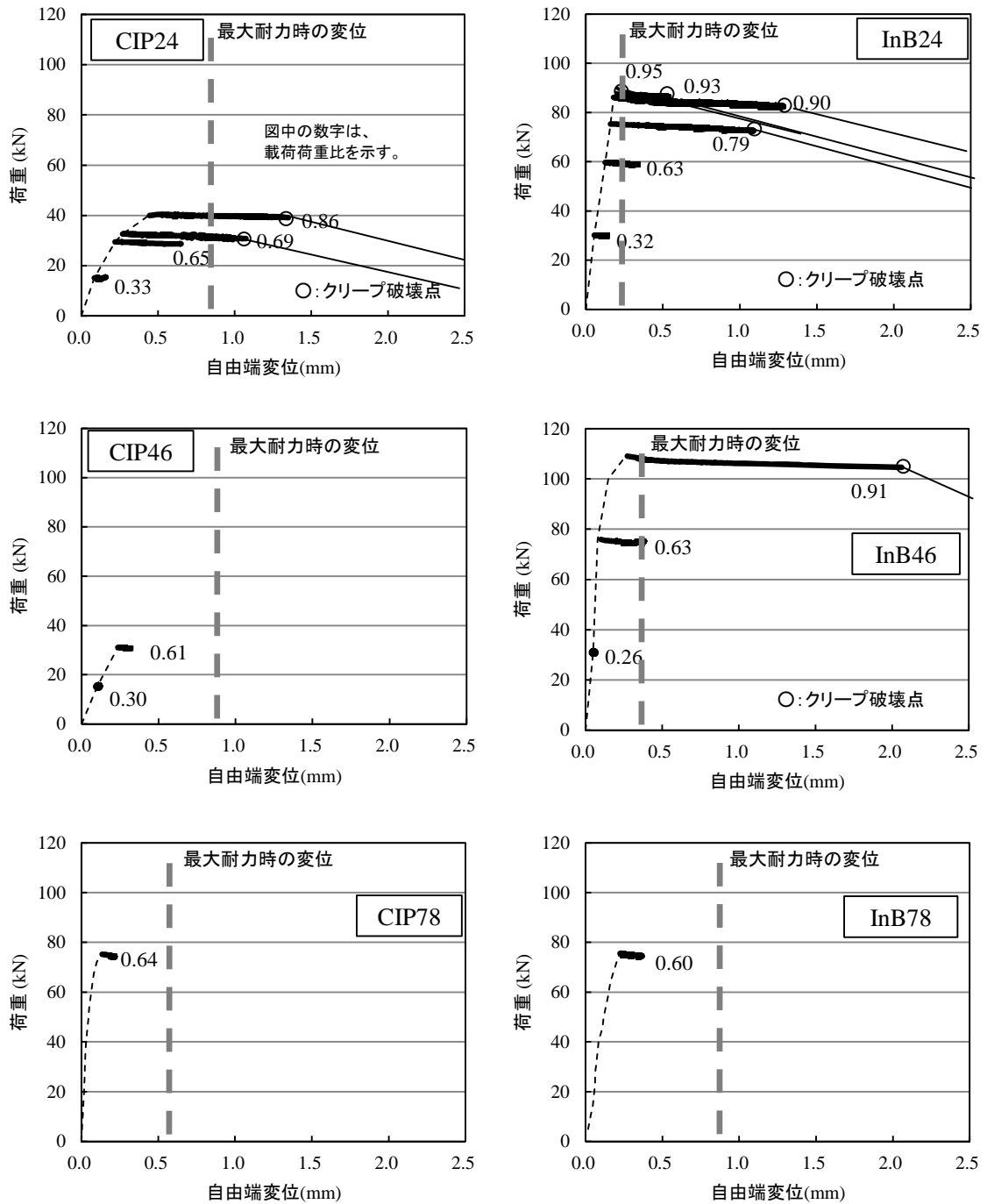


図4-3-7 クリープ試験期間における荷重と変位の関係

プ破壊に至る時間が長いほど、クリープ破壊時の変位は大きくなる傾向であった。載荷1日以降にクリープ破壊が発生した試験体のクリープ破壊直前の変位は、CIPでは付着強度試験の最大耐力時の変位の1.5倍，InBでは1.5~3.0倍であった。

これは、付着強度試験時には観測されないクリープひずみが、クリープ破壊時の変位に

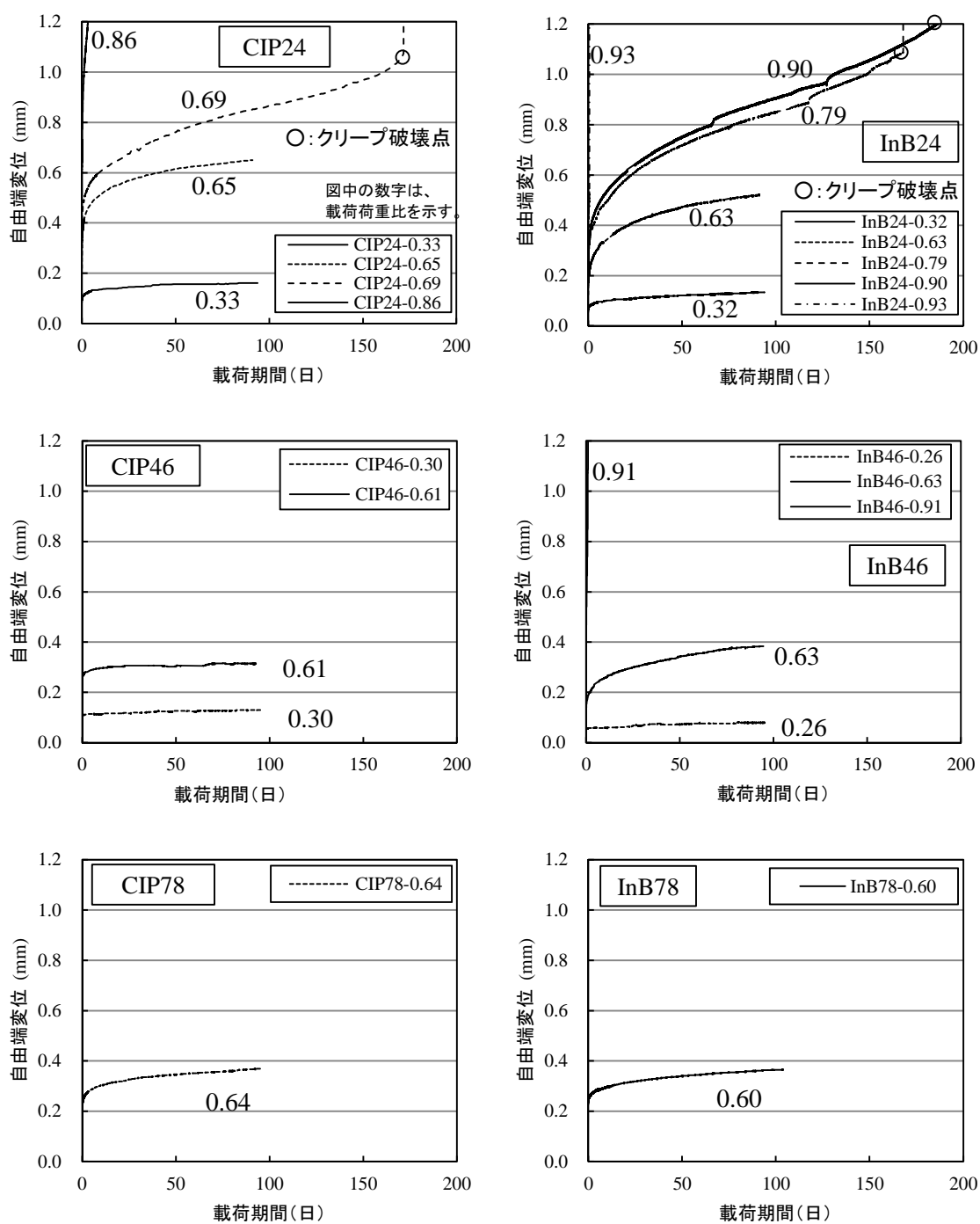


図4-3-8 コンクリート強度によるクリープ曲線

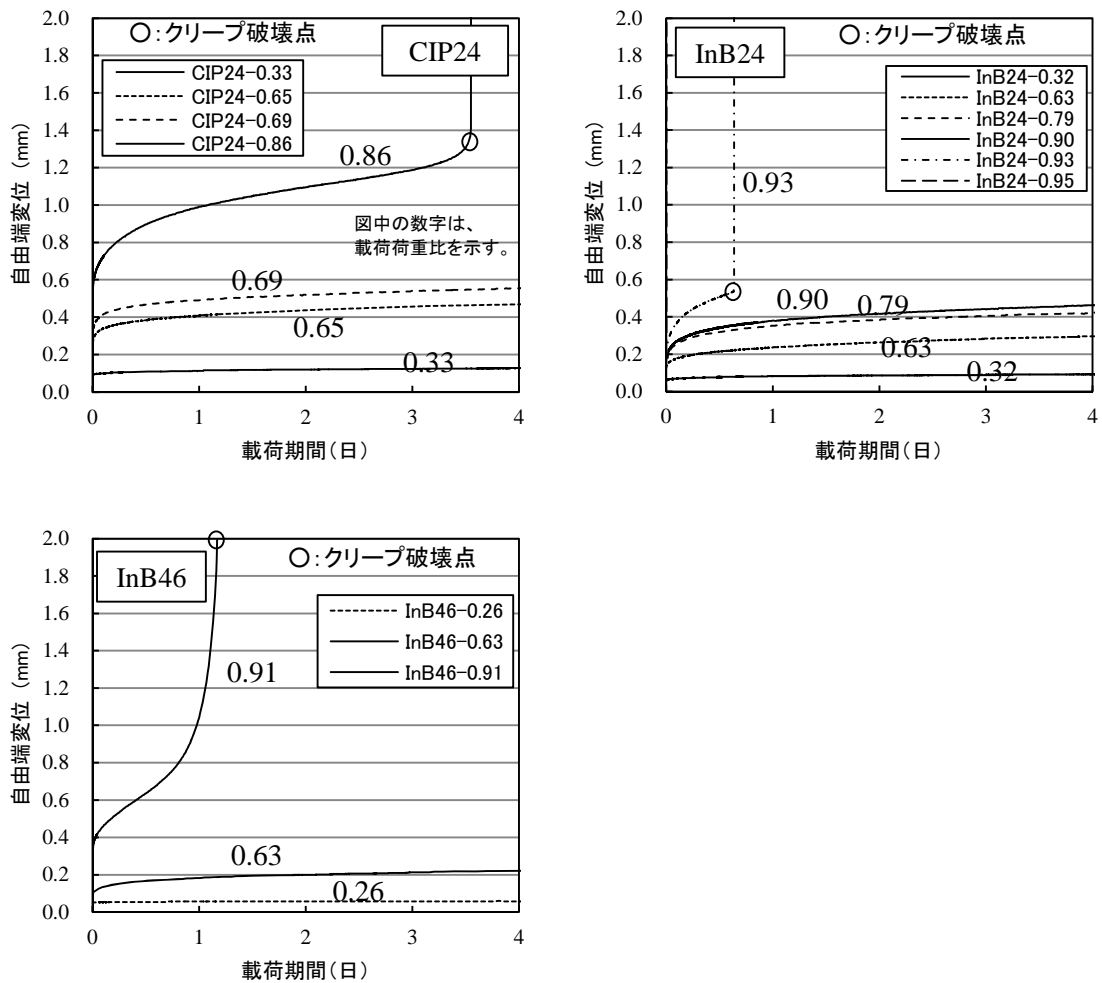


図4-3-9 短期間でクリープ破壊を起こした試験体のクリープ曲線

は加わるため、クリープ破壊時の変位は、付着強度試験時の変位より大きくなるものと推測される。

一般にクリープ挙動は、ひずみの状況から、遷移クリープ、定常クリープ、加速クリープの3段階に分けられる[4-6]。図4-3-8、図4-3-9より、いずれの試験体においても時間とともにクリープ速度が小さくなる遷移クリープは確認された。クリープ破壊したクリープ曲線において、CIP24-0.69、CIP24-0.86、InB46-0.91では、クリープ破壊前より若干のクリープ変位変形速度の上昇があり、加速クリープが認められた。一方、InB24-0.79、InB24-0.93では、クリープ破壊直前までクリープ変位変形速度の上昇は確認されなかった。InB24-0.90においては、クリープ破壊の数日前より若干のクリープ変位変形速度の上昇が認められたものの、CIP24-0.69に比べ、上昇速度は小さいものであり、明確な加速クリープは確認されなかった。加速クリープ現象の発生の有無の理由については、今後のさらなる研究が必要である。

長期的なクリープ変形量を推定するため、EOTA ETAG 001 Part5[4-2]（以下、ETAG 基準と記す）に従い、式（4-1）の定数 a 、 b を試験結果の最終 20 日間以上のデータである載荷開始から 20 日以降の値より算出した。

$$S(t) = S(0) + a \cdot t^b \quad \text{式 (4-1)}$$

ここに、 $S(t)$: 時間 t における変位量
 $S(0)$: 載荷直後における変位量
 t : クリープ開始後の時間
 a, b : 実験によって求める定数

図4-3-10、表4-3-5にクリープ変位の推定結果を示す。ETAG基準では、式（4-1）により50年後を外挿推定し、付着強度試験における最大耐力時の平均変位未満でなければならぬとしている。これに従いクリープ評価を実施する。最大耐力時の変位に達する時間は、CIP24-0.33では35000年、InB24-0.33では48年、CIP46-0.30では18000年、InB46-0.26では59年と計算される。また、今回の結果で50年未満となるのは、CIP24-0.65、InB24-0.32、InB24-0.63、InB46-0.63、CIP78-0.64が該当し、最大耐力時の変位が小さいものは、クリープ変位への到達時間が短くなることが判明した。

ETAG 基準で適用している式（4-1）は、プラスチックのクリープ変形に基づいたものであり[4-7]、欧米においては、有機系アンカーが使用され、無機系アンカーは使用されていない。そのため、推定式の適用において、無機系材料のようなクリープ変位の小さなものへの適用は想定していないものと思われる。

クリープ破壊時のクリープ変位は、最大耐力時の変位より大きくなる。ETAG 基準では、安全側で評価するために、最大耐力時の変位を用いているものと思われる。しかし、無機系材料最大耐力時の変位量が小さいため、この値の適用は、著しく安全側の評価となる。そのため、無機系材料に対するクリープ評価方法については、妥当な評価方法の提案が必要である。

図 4-3-11 に載荷荷重比と載荷材齢 20 日から 90 日における変位変化量の関係を示す。図 4-3-8 からは、載荷材齢 20 日以降で定常クリープ状態と判断されるため、材齢 20 日から 90 日の変位変化量は、定常クリープ期におけるクリープ速度を表す。

母材コンクリート強度が同一の場合、載荷荷重比の増加にともないクリープ速度は増加する。InBではコンクリート強度が高くなるに従い、変位変化量（クリープ速度）の傾きは小さくなり、コンクリート強度が高くなるに従い、クリープ速度は小さくなる傾向が認められる。

CIP46-0.61 では、図 4-3-8 より測定不良とみられ、CIP46 のプロットは適当ではないものと考えられるため、CIP24 と CIP78 のみを比較を行う。CIPにおいても、InBと同様

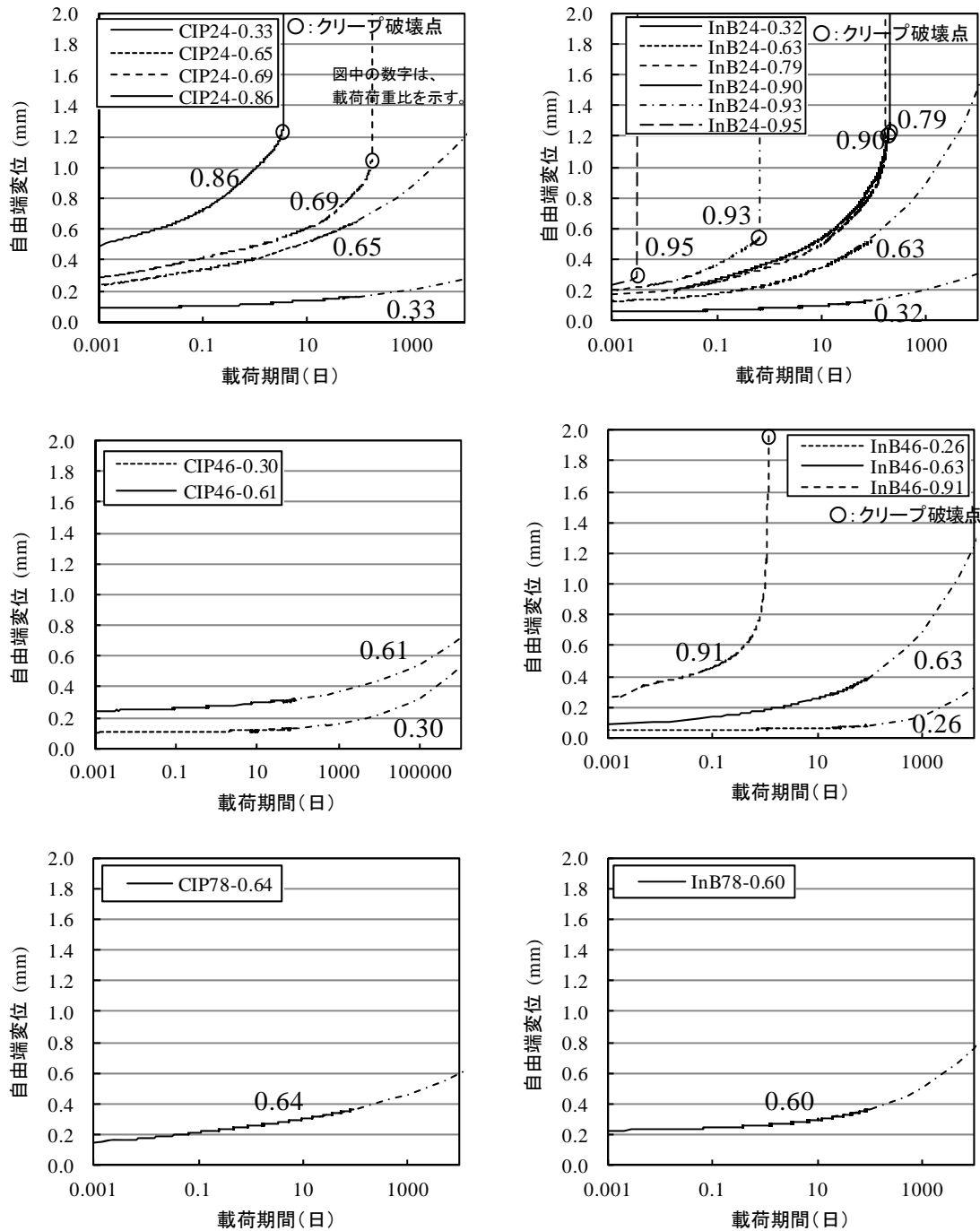


図4-3-10 クリープ変位曲線

にコンクリート強度が高くなるに従い、クリープ速度は小さくなる傾向が認められる。これらの事から、コンクリート強度は、クリープ速度に影響を与えることが判明した。

図4-3-12に推定式から求めた載荷材齢250年までのクリープ曲線を示す。InBのクリープ曲線は、CIPのクリープ曲線より載荷時間ともなう変形量が大きくなっている。これは、

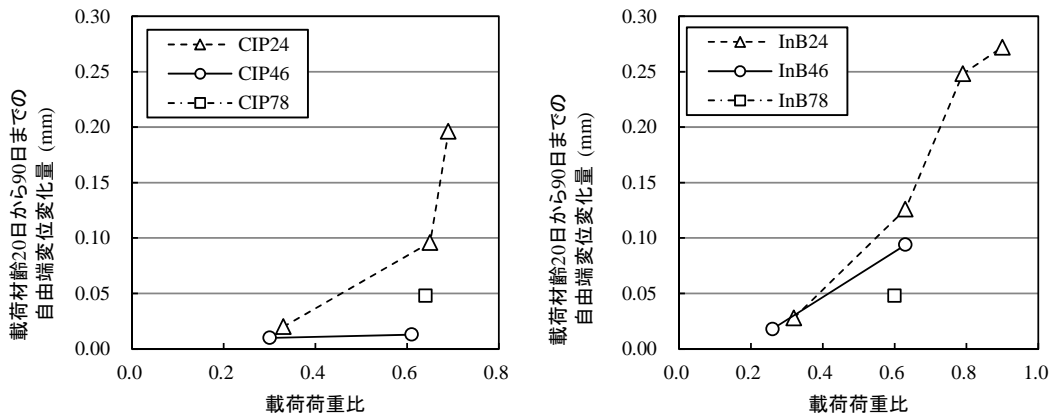


図4-3-11 載荷材齢90日における載荷荷重比と変位の関係

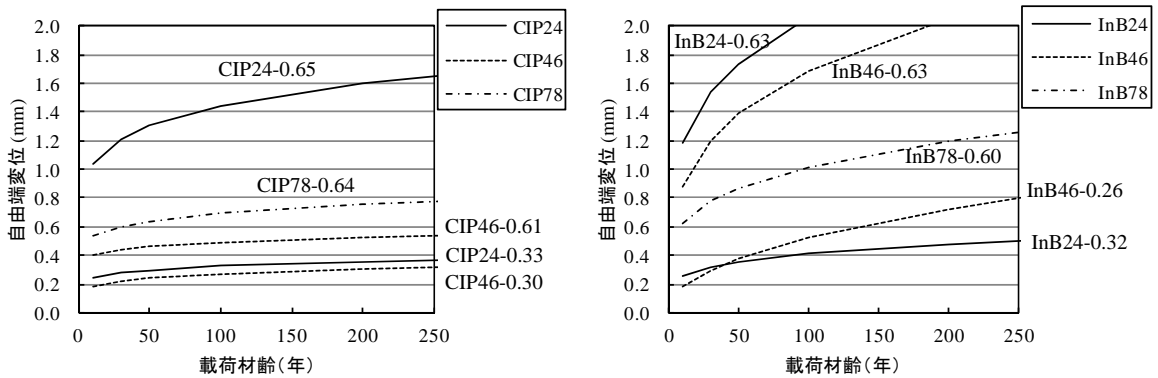


図4-3-12 載荷期間と変位の関係

同一の載荷荷重比において、InB24、InB46の載荷荷重が、CIP24、CIP46の2倍程度大きい場合、母材コンクリートの影響が寄与していることが考えられる。

InB46-0.26の変位は、載荷期間約35年でInB24-0.32の変位を上回る結果となった。両者の載荷荷重には大きな差がないため、長期において差が生じることは、推定が適切に行われていないことが考えられる。推定式が、プラスチックのクリープ変形に基づいたものであるため、無機系材料には適していない可能性がある。そのため、無機系に適する推定式の提案の必要がある。

InB24-0.63、InB46-0.63では、載荷材齢に対し、変位の増加量は大きくなっている。コンクリートの圧縮クリープは、高載荷荷重下においては、コンクリート内部の微小ひび割れの発生が顕著と言われている。今回の載荷荷重比0.6程度のクリープ試験後の試験体を観察したところ、反力板の内径に沿って極わずかな浮きが認められた。荷重比0.3程度では、載荷板内径に沿った浮きは認められておらず、無機系あと施工アンカーにおいても高載荷荷重域において、載荷部には微小ひび割れが発生した可能性が推測される。この微細ひびわれ発生により高載荷荷重域では、変形速度が大きくなっていることが考えられる。

(4) まとめ

強度の異なる3種類のコンクリートを用いて、無機系注入式あと施工アンカーと先付けアンカーの付着強度試験および引張クリープ試験を実施し、以下の知見を得た。

- 1) 母材コンクリート強度 24N/mm^2 、 46N/mm^2 において、無機系注入式アンカーは先付けアンカーの2倍程度の付着強度を示し、母材コンクリート強度 78N/mm^2 では、両者ともアンカー筋降伏後付着破壊を生じた。
- 2) クリープ破壊直前の変位は、いずれの試験体においても付着強度試験の最大耐力時の変位より大きくなる。クリープ破壊に至る時間が長いほど、クリープ破壊時の変位は大きい傾向となり、今回の試験においては、クリープ破壊直前の変位は、先付けアンカーでは付着強度試験時の1.5倍、無機系注入式あと施工アンカーでは1.5~3.0倍大きな変位値であった。
- 3) EOTA ETAG 001 Part5によるクリープ評価方法を無機系注入式アンカーに適用した場合、クリープ限度より著しく小さい載荷荷重比においてもクリープ破壊の危険があるものと評価される可能性がある。そのため、付着強度試験時の変位が小さいものへのEOTA ETAG 001 Part5による評価の適用は、不相当と推定され、無機系材料に対するクリープ評価方法についての検討が必要である。
- 4) コンクリート強度がアンカーのクリープに与える影響は、コンクリート強度が高くなるにともない、クリープ速度は小さくなる。

4. 3. 2

鉄筋径があと施工アンカーに及ぼす影響に関する検討

(1) 目的

ACI, ETAGの規格において、あと施工アンカーのクリープ試験に用いるアンカー筋は全ねじM12の使用が基本となっている。日本におけるあと施工アンカーのクリープ試験においても、全ねじM12やD13の比較的アンカー筋径が小さい鉄筋を用いて試験が行われている。アンカー筋径がクリープに及ぼす影響について検討された例はなく、アンカー筋の径の違いがクリープ及ぼす影響は、確認されていない。そこで、アンカー筋D13とD19についてクリープ試験を行い、アンカー筋径によるクリープ挙動の比較を行った。

(2) 実験概要

①使用材料および試験体の作製方法

試験には、3章で物性を調べた超速硬セメント系あと施工アンカーを用いた。付着強度試験およびクリープ試験に用いた試験体形状を図4-3-13に示す。コンクリート割裂防止のため鋼管(外径216mm, 厚さ4.5mm)にコンクリートを打ち込んだ試験体を使用し、アンカー筋の埋込み長さを $7d_a$ (d_a : アンカー筋の呼び径), アンカー筋は、高強度鉄筋のD13とD19を用いた。また、テンションロッドを接続するためにD13では全ねじM14(種類:SNB7)を、D19ではM20(種類:SNB7)をフラッシュバット溶接でアンカー筋と接合した。表4-3-5に付着強度試験およびクリープ試験に用いた母材コンクリートおよびアンカー筋の物性値を示す。母材コンクリートの物性試験はJIS A1108に準拠し $\phi 100 \times 200$ mmの円柱供試体を用い、付着強度試験実施と同時に測定を行った。

あと施工アンカーの穿孔には湿式コアドリルを使用し、穿孔径はD13では $\phi 18$ mm, D19では $\phi 24$ mmで行った。試験体は、試験体作製から約2年を経過したものを使用し、付着強度試験を実施した後に、その後にクリープ試験を開始した。

②付着強度試験

付着試験における反力板は、D13では内径 $\phi 30$ mmを使用し、D19では内径 $\phi 40$ mmを使用した。その他の試験条件は、4章3節1項(2)と同様とし付着強度試験を実施した。

③クリープ試験

クリープ試験装置は、4章2節で検証した装置を使用した。ただし、D19の載荷荷重比0.67においては、載荷荷重がコイルばねの仕様限度以上であったため、コイルばねをサラバネに変更した。サラバネは、外径 $\phi 200$ mm, 内径 $\phi 102$ mm, 厚さ12mmのものを16枚直列に接続し使用した。クリープ試験は 20°C , 60%R.H.の恒温室内で行った。

クリープ試験の載荷荷重は、付着強度試験結果の最大耐力に対し0.30~0.67の荷重になるように載荷した。クリープ試験は各1本で行い、荷重、自由端および載荷端側のアンカー筋の拔出量を測定した。D19については、載荷後約5カ月で除荷し、除荷後の試験体についても付着強度試験を実施した。クリープ試験条件を表4-3-6に示す。

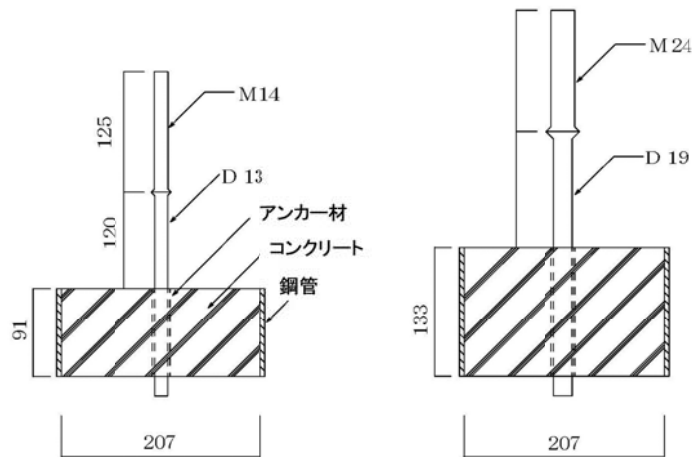


図 4-3-13 試験体形状

表 4-3-5 付着試験およびクリープ試験に用いた試験材料の物性

| 母材コンクリート | | アンカー筋 | | | |
|------------------------------|--------------------------------|-------|-------|------------------------------|--------------------------------|
| 圧縮強度 (N/mm ²) | 静弾性係数 (kN/mm ²) | 径 | 種類 | 降伏応力 (N/mm ²) | 静弾性係数 (kN/mm ²) |
| 30.3 | 27.8 | D13 | MK785 | 791 | 190 |
| | | D19 | SD685 | 936 | 210 |

表 4-3-6 クリープ試験条件

| 試験体 | 載荷荷重 (kN) | 載荷荷重比 | アンカー筋 | 埋込み長さ (mm) |
|----------------|--------------|-------|-------|---------------|
| InPIB-D13-0.35 | 32.8 | 0.30 | D13 | 91 |
| InPIB-D13-0.53 | 49.1 | 0.45 | | |
| InPIB-D13-0.69 | 64.8 | 0.59 | | |
| InPIB-D19-0.34 | 71.1 | 0.34 | D19 | 133 |
| InPIB-D19-0.50 | 106.1 | 0.50 | | |
| InPIB-D19-0.66 | 140.7 | 0.66 | | |

(3) 試験結果および考察

①付着強度試験結果

図 4-3-6 に付着強度試験の自由端の荷重-変位曲線を示す。D19 の変位は D13 に比べ、最大耐力付近においても変位の増加が小さく、非常に高い剛性を示した。付着強度 τ_{bl} は、D13 において 30.3N/m²、D19 では 26.6N/mm² であり、D19 は、D13 に比べ若干低い値を示した。

②クリープ試験結果

図 4-3-7, 図 4-3-8 にクリープ試験における載荷時間と自由端変位の結果を示し、長期的なクリープ変形量を推定するため、4 章 3 節 1 項 (3) と同様に EOTA ETAG 001 Part5[4-2]に従い、

長期持続荷重における変位を推定した。

図4-3-7よりアンカー筋D13において、載荷荷重比0.45以下の自由端変位の増加は、ほとんど認められず、載荷荷重比0.59のクリープ変形量は、時間とともに徐々に増加する傾向が認められた。載荷材齢50年におけるクリープ変形量は、D13の載荷荷重比0.33, 0.45では最大耐力時の変位以下であり、クリープ破壊の可能性が小さい事がわかった。

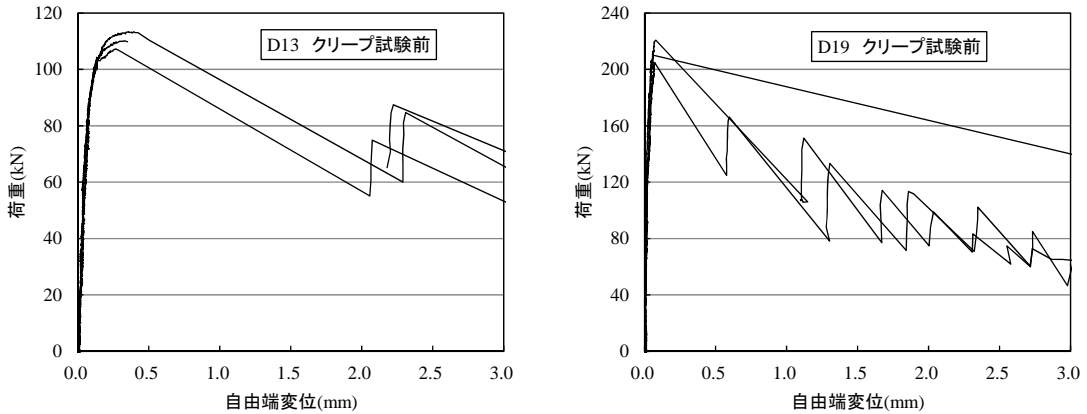


図 4-3-6 付着強度試験における荷重－変位曲線

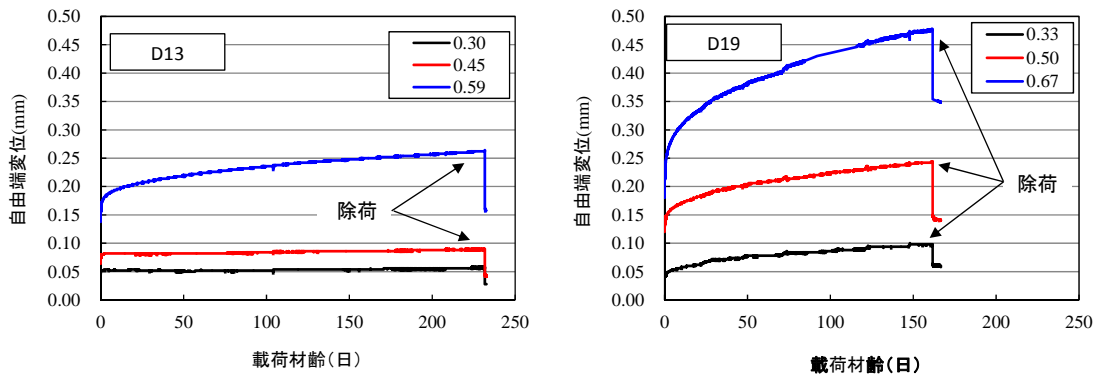


図 4-3-7 鉄筋径によるクリープ曲線

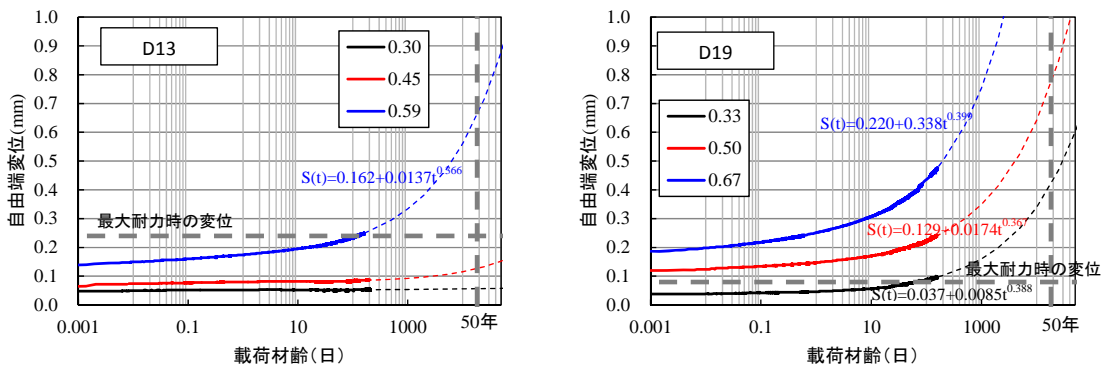


図 4-3-8 鉄筋径によるクリープ曲線

D19における載荷荷重比0.33のクリープ変形量は、載荷材齢とともに増加する傾向は認められたが、クリープ変形量の推定から、50年における自由端変位量は、図4-3-8より約0.4mm程度であるものと推測された。D19の最大耐力時の変位は、0.08mmと非常に小さな値であり、載荷荷重比0.33で載荷材齢90日では最大耐力時の変位以上の値となった。しかし、載荷荷重比0.67の自由端変位は、0.4mm以上においても、クリープ破壊は発生していない事から、D19の載荷荷重比0.33で載荷期間50年では、クリープ破壊を生じる可能性は低いものと推測された。

載荷材齢20日から160日までのクリープ変位変形量と載荷荷重比の関係を図4-3-9、クリープ変形量と載荷荷重の関係を図4-3-10、クリープ変形量とコンクリート表面積に対する応力の関係を図4-3-11に示す。ここで、図4-3-7のクリープ曲線より、載荷材齢20日以降は定常クリープ域と考えられたため、定常クリープ域である載荷材齢20日以降で評価を行った。

図4-3-9のD13とD19の載荷荷重比の比較において、荷重比に対する変位の増加量は、D13とD19では同様の傾向を示し、載荷荷重比50~60%において変位の増加量が大きくなる傾向が認められた。また、同一荷重比における変位変化量については、D13よりD19の方が大きくなる傾向が認められた。

図4-3-10の載荷荷重でD13とD19を比較した場合は、載荷荷重が60kN以上でクリープ変形量が大きくなった。鉄筋径に関わらず応力が同じであれば、変位は同様となることが考えられたが、母材コンクリートへの影響が考えられたため、穿孔したコンクリートの表面積に対する応力とクリープ変

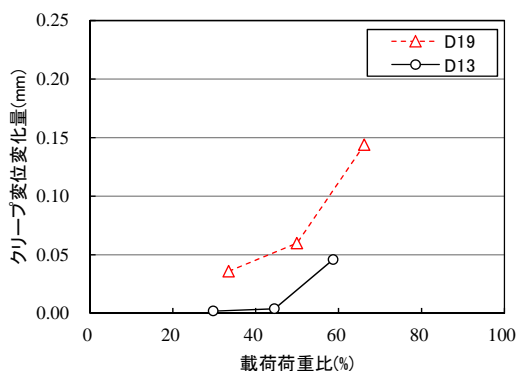


図 4-3-9 載荷荷重比とクリープ変形量

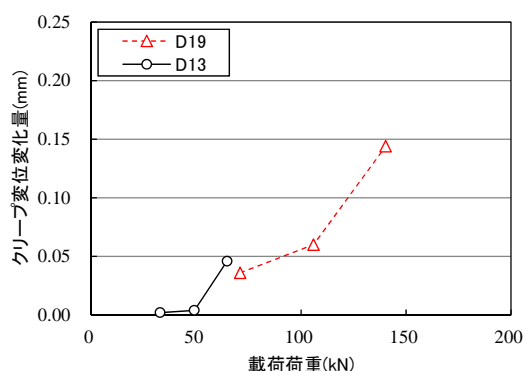


図 4-3-10 載荷荷重とクリープ変形量

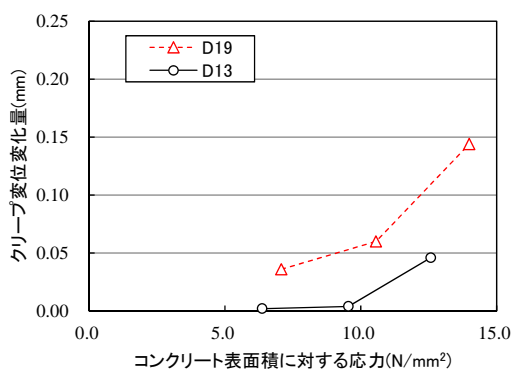


図 4-3-11 載荷荷重比とクリープ変形量

形量の関係を調べた(図4-3-11)。コンクリート表面に対する応力においても、載荷荷重比の結果と同様の傾向であり、コンクリート表面に対する応力が同程度であっても、D13とD19ではクリープ変形量が異なった。

これより、クリープに与える影響においては、載荷荷重比だけでなく、載荷荷重も考慮する必要があることが判明した。この原因については、短期試験では影響が確認できなかった鉄筋の節等の形状の影響が、長期持続荷重においては、変形量の影響に明確にあらわれた可能と考えられる。節の影響について検討をすすめる場合には、節高さ、ピッチを変えた鉄筋を作製して試験を実施する必要があり、これによりクリープに及ぼす節の影響が明確になるものと考えられる。

クリープ試験前後の付着試験結果を表4-3-7に示す。D13の試験体のクリープ試験前の付着強度 τ_{bl} は、 30N/mm^2 であるのに対し、クリープ試験後の付着強度 τ_{bl} は、載荷荷重比0.30では、クリープ試験前と同等であったが、載荷荷重比0.45、0.59では、クリープ試験前の付着強度に対し、90%程度となった。

D19においても、同様に載荷荷重比0.50、0.67では、クリープ試験前の付着強度よりクリープ試験後の付着強度は低下し、強度の低下量は約85%となった。

D19の載荷荷重比0.67の試験体は、クリープ試験後の載荷側表面に、鉄筋から外周方向へ

表 4-3-7 クリープ試験前後の付着強度試験結果

| 試験体名 | | アンカー筋径*1 (mm) d_{a1} | 埋込み長さ (mm) l_b | 最大耐力 | | 付着強度*2 | | 拔出し量 | |
|-------------|----------|------------------------------|------------------------|-----------|-------|----------------------|------|------------|------|
| | | | | (kN) | | (N/mm ²) | | (mm) | |
| | | | | P_{max} | Avg. | τ_{bl} | Avg. | δF | Avg. |
| クリープ 試験前 | D13 | 12.7 | 91 | 113.2 | 110.2 | 31.2 | 30.3 | 0.12 | 0.24 |
| | | 12.7 | 91 | 107.2 | | 29.5 | | 0.27 | |
| | | 12.7 | 91 | 110.1 | | 30.3 | | 0.33 | |
| | D19 | 19.1 | 133 | 210.3 | 211.9 | 26.4 | 26.6 | 0.06 | 0.08 |
| | | 19.1 | 133 | 204.8 | | 25.7 | | 0.07 | |
| | | 19.1 | 133 | 220.7 | | 27.7 | | 0.11 | |
| クリープ 試験後 | D13 0.30 | 12.7 | 91 | 112.4 | | 31.0 | | 0.13 | |
| | D13 0.45 | 12.7 | 91 | 97.6 | | 26.9 | | 0.12 | |
| | D13 0.59 | 12.7 | 91 | 104.0 | | 28.6 | | 0.17 | |
| | D19 0.33 | 19.1 | 133 | 220.9 | | 27.7 | | 0.10 | |
| | D19 0.50 | 19.1 | 133 | 178.2 | | 22.3 | | 0.07 | |
| | D19 0.67 | 19.1 | 133 | 182.1 | | 22.8 | | 0.11 | |

*1: アンカー筋公称径

*2: $\tau_{bl} = P_{max} / (\pi \times d_{a1} \times l_b)$



写真4-3-3 クリープ試験後の試験体状況(鉄筋D19, 載荷荷重比0.67)

のひび割れが確認され、反力板部分に沿った若干の浮きが認められた(写真4-3-3)。自由端側にはひび割れ等は確認されなかった。クリープ試験後の付着強度の低下原因として、クリープ試験後の試験体の観察結果から、長期持続荷重により母材コンクリートにも影響を与えていたと考えられる。4章3節1項の結果より先付けアンカーの付着強度は、超速硬セメント系あと施工アンカーの1/2程度であることから、先付けアンカーの最大耐力程度の荷重となっていたと考えられ、あと施工アンカーの載荷荷重比0.50では、母材コンクリート側へ影響を与えていたことが推測される。

(4) まとめ

D13とD19の2種類の鉄筋を使用し、超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着強度試験および引張クリープ試験を実施し、以下の知見を得た。

- 1) 同一の載荷荷重比においてD13よりD19の方がクリープ変形量は大きくなる傾向であるものの、載荷荷重比の増加に対する変位の増加割合は、鉄筋径によらず同等である。
- 2) 載荷荷重比だけでなく、載荷荷重もあと施工アンカーのクリープ変形量に影響を与えるため、クリープを評価する上で、載荷荷重を考慮し試験を実施する必要がある。
- 3) 拘束試験によるクリープ試験では、載荷荷重比0.45以上で、クリープ試験後に付着強度は低下し、その付着強度の低下量は、10~15%程度であった。これは、試験体の観察結果より、長期持続荷重が母材コンクリートへ影響を与えていたことが考えられる。

4. 3. 3 拘束方法があと施工アンカーに及ぼす影響に関する検討

(1) 目的

ACI355-4[4-4], EOTA ETAG 001 Part5[4-2]でのアンカーのクリープ評価は、穿孔径の1.5~2.0倍の内径を持つ反力板を使用して、拘束試験によるクリープ評価を行っている。しかしながら、アンカーの耐力試験では、非拘束試験でアンカー筋の耐力を評価することもある。ここでは、内径 165mm の反力板を用いて、非拘束試験におけるクリープ試験を実施した。

(2) 実験概要

①使用材料および試験体の作製方法

試験用いたアンカー材は、3章で物性を調べた超速硬セメント系あと施工アンカーを用いた。引張強度試験およびクリープ試験に用いた試験体形状を図 4-3-12 に、反力板を図 4-3-13、写真 4-3-4 に示す。アンカー筋は、高強度鉄筋の D13 を用い、4章2節と同様に試験体を作製した。

引張強度試験およびクリープ試験に用いた試験体は、アンカー筋を定着させてから、約2年を経過したものを使用し、クリープ試験は 20℃、60%R.H.の恒温室内で行った。

②引張強度試験

引張強度試験は、4章3節1項の(2)と同様の装置を用い、反力板は内径 165mm (図 4-5-1) の反力板を使用し引張強度試験を行った。反力板の内径は、埋込み長さに対して 1.8 倍のものとした。比較試験として先付けアンカーの引張強度試験も実施した。

③クリープ試験

クリープ試験装置は、4章2節で検証した装置を使用した。表 4-3-8 にクリープ試験条件を示す。クリープ試験の載荷荷重は、引張強度試験の最大耐力に対する載荷荷重比 0.33, 0.50, 0.67 の荷重になるように載荷した。クリープ試験は各 1 本で行い、荷重、自由端および載荷端側のアンカー筋の拔出量を測定した。

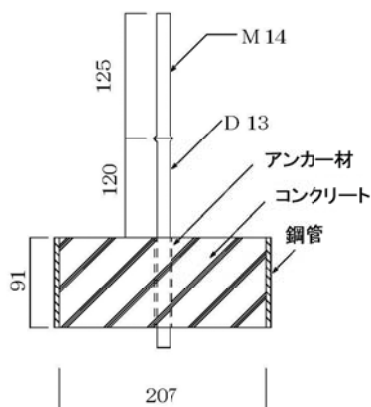


図 4-3-12 試験体形状

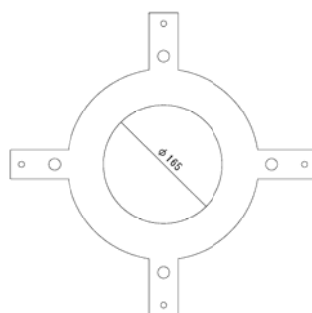


図 4-3-13 反力板形状



写真 4-3-4 反力板

表 4-3-8 クリープ試験条件

| 試験体名 | 鉄筋 | コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²) | 載荷荷重 (kN) | 荷重比 |
|-----------|-----|--|--------------|------|
| 29kN-0.30 | D13 | 29.6 | 29 | 0.33 |
| 44kN-0.50 | | | 44 | 0.50 |
| 59kN-0.67 | | | 59 | 0.67 |

また、クリープ試験終了後、クリープ試験に使用した試験体の残存耐力を調べるために、引張強度試験を行った。

(3) 試験結果および考察

表 4-3-9 に引張強度試験結果を、図 4-3-14 に荷重－変位曲線を示す。引張強度試験における最大耐力は、平均で 88.4kN であった。最大耐力は、第一ピークが最大耐力のものと第二ピークが最大耐力となるものがあり、試験体により最大耐力時の変位に大きな差が生じた。破壊形状については、一部付着破壊が含まれるコーン状破壊であり、付着破壊部の長さは約 30～50mm であった（写真 4-3-5）。

図 4-3-15 にクリープ変形挙動を示す。90 日まで載荷を続けた後に除荷し、除荷後 7 日間回復クリープの測定を行った。持続載荷による自由端変位は、載荷荷重が大きくなるほど大きく、載荷時間に対する変形量も大きくなった。また、除荷後の回復クリープについては、59kN 載荷した試験体では除荷後 7 日間で自由端において、0.016mm の回復クリープが認められた。

表 4-3-9 引張強度試験結果

| | | 最大耐力 | | 最大耐力時の変位 | | | |
|-------------|-----------|------|------|----------|------|------|------|
| | | (kN) | | (mm) | | | |
| | | | Avg. | 自由端 | Avg. | 載荷端 | Avg. |
| クリープ 試験前 | ① | 78.9 | 88.4 | 0.53 | 0.44 | 1.64 | 1.73 |
| | ② | 92.9 | | 0.52 | | 1.82 | |
| | ③ | 93.5 | | 0.27 | | 1.73 | |
| クリープ 試験後 | 29kN-0.33 | 90.5 | | 0.64 | | 2.13 | |
| | 44kN-0.50 | 73.1 | | 0.41 | | 1.16 | |
| | 59kN-0.67 | 81.0 | | 0.62 | | 2.04 | |
| 先付け アンカー | ① | 40.3 | 43.6 | 0.38 | 0.76 | 0.96 | 1.23 |
| | ② | 47.5 | | 1.01 | | 1.40 | |
| | ③ | 43.1 | | 0.91 | | 1.33 | |

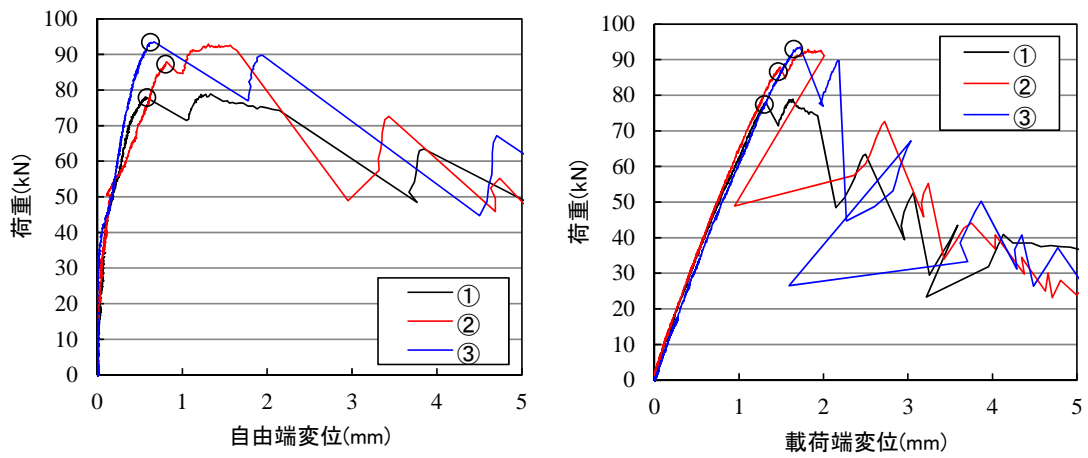


図 4-3-14 引張試験時の荷重－変位曲



写真 4-3-5 試験体破壊状況

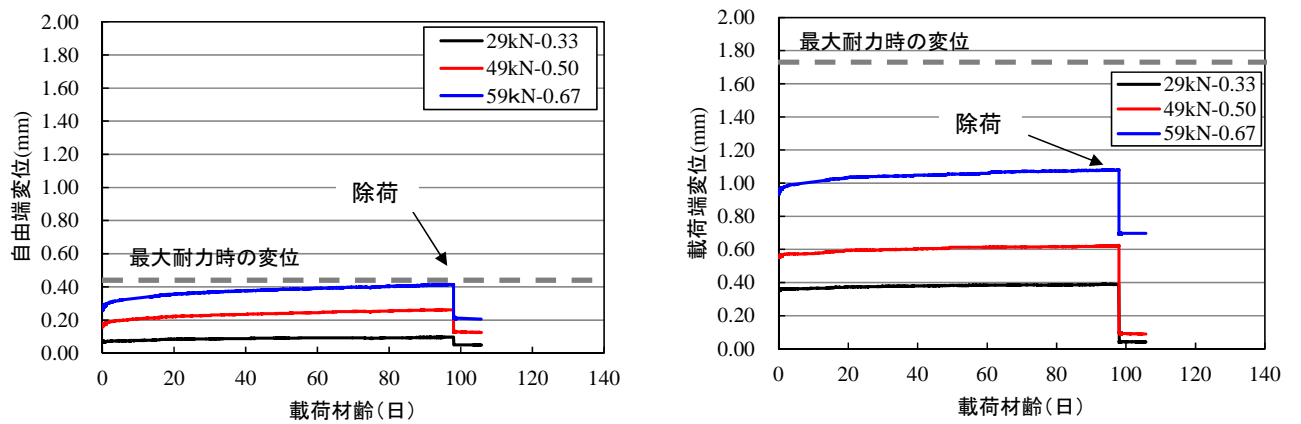


図 4-3-15 クリープ変位曲線

表 4-3-10 非拘束試験と拘束試験の比較

| | 載荷荷重比 | 載荷荷重 (kN) | 載荷材齢 90 日における変位 | | 変位割合 $\delta F/\delta L$ |
|----------------------|-------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | | 自由端変位 (mm) δL | 載荷端変位 (mm) δF | |
| 非拘束試験 | 0.33 | 29 | 0.10 | 0.39 | 4.1 |
| | 0.50 | 44 | 0.26 | 0.63 | 2.4 |
| | 0.67 | 59 | 0.41 | 1.08 | 2.6 |
| 拘束試験 (4章3節 2項) | 0.30 | 33 | 0.05 | 0.30 | 5.7 |
| | 0.45 | 49 | 0.08 | 0.48 | 5.7 |
| | 0.59 | 65 | 0.23 | 0.78 | 3.3 |

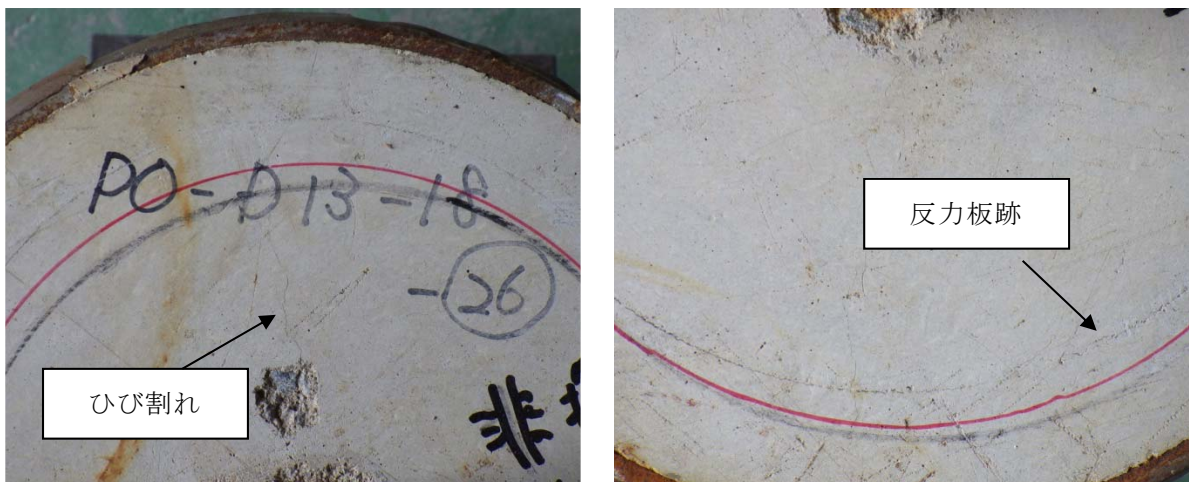


写真4-3-6 クリープ試験後の試験体状況

表4-3-10に非拘束試験における結果とほぼ同等のコンクリート強度である4章3節2項での拘束試験の結果を示した。載荷材齢90日における自由端変位に対する載荷端端変位の割合は、載荷荷重比0.33では4.1倍、載荷荷重比0.50では2.4倍、載荷荷重比0.67では、2.6倍であった。拘束試験の自由端変位は、非拘束試験より小さく、自由端変位に対する載荷端端変位の割合は大きくなった。同一載荷荷重における拘束試験の自由端の変位は、非拘束試験の変位の約1/2であった。

クリープ試験後の引張強度試験では、載荷荷重比0.50以上で、クリープ試験により最大耐力は低下した。クリープ試験後の試験体の状況を観察したところ、載荷荷重比0.50、0.67において、反力板とコンクリートの界面に反力板の跡が残っており、載荷荷重比0.67では、載荷側のコンクリート表面に2本のひび割れが観察された(写真4-3-6)。

先付けアンカーの引張強度試験では、最大耐力が40kN程度であった。載荷荷重比0.50では、先付けアンカーの最大耐力と同等の載荷を行っているため、クリープ試験時に、母材コンクリートの内

部にマイクロクラックが発生していた可能性がある。この影響により載荷荷重比0.50, 0.67のクリープ試験後の試験体では、最大耐力がクリープ試験前より低下したと考えられる。

これらのことから、付着強度の高い材料における高荷重域でのクリープ試験時においては、アンカー材だけでなく母材コンクリートへも影響を及ぼしていることが考えられ、それにとまなう母材コンクリートのマイクロクラックの発生にとまなうクリープ変形量も加味されるものと推測される。

(4) まとめ

超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの非拘束によるクリープ試験を実施し、以下の知見を得た。

- 1) 同一載荷荷重比における非拘束によるクリープ試験の自由端変位は拘束試験より大きく、非拘束試験の自由端の変位は、拘束試験の変位の約2倍である。
- 2) 非拘束のクリープ試験において、先付けアンカーの最大耐力以上での長期持続載荷により、母材コンクリートへマイクロクラックの発生が推測され、このクラックの影響によりクリープ試験後の耐力は低下するものと考えられる。

4.3.4 有機系材料との比較検討

(1) 目的

接着系あと施工アンカーでは、有機系アンカーが多く使用されており、ACI355-4[4-4]では有機系アンカーのみを対象としている。そのため、ACI355-4におけるクリープ評価は、有機系アンカーの挙動に基づいて作成されたものと思われる。しかし、有機系材料と無機系材料では材料特性が大きく異なるため、クリープ挙動も大きく差異があるものと推定される。そこで、有機系注入式あと施工アンカーと無機系注入式あと施工アンカーのクリープ挙動を比較し、挙動の違いを明らかにすることを目的とした。

(2) 実験概要

①使用材料および試験体の作製方法

試験には、表 4-3-11 に示す 3 種類の接着系アンカーを用いた。試験用いた無機系注入式アンカーは、3章で物性を確認した超速硬セメント系あと施工アンカーを用いた。有機系あと施工アンカーは、エポキシ樹脂を主剤とするものとエポキシアクリレート樹脂を主剤とする 2 種類を用いた。有機系あと施工アンカーは、主剤と硬化剤を定量的に押し出す専用ガンに主剤と硬化剤を取り付け、先端に取り付けられたスタティックミキシングノズルにより混合されたものを孔内に注入するタイプを使用した。

アンカー筋は、高強度鉄筋の D13 を用い、4章2節と同様に試験体を作製した。表 4-3-12 に試験に用いた母材コンクリートおよびアンカー筋の物性を示す。引張強度試験およびクリープ試験に用いた母材コンクリートは打設後 1 年以上経過したものであり、付着強度試験は、アンカー施工 28 日以上経過後に行い、その後にクリープ試験を開始した。試験体の穿孔は、湿式コアドリルにて行い、穿孔径は無機系あと施工アンカー (In) では $\phi 18\text{mm}$ 、エポキシ樹脂系アンカー (Ep)、エポキシアクリレート樹脂系 (Ea) については $\phi 16\text{mm}$ とした。クリープ試験は 20°C 、60%R.H.の恒温室内で行った。

表 4-3-11 接着系アンカーの性状

| 記号 | 接着剤種類 | 主剤 | 硬化剤 | 圧縮強度 (N/mm^2) | 静弾性係数 (kN/mm^2) |
|----|-----------------------|--|-----------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| In | セメント系 | 超速硬セメント | 水 | 62.4 | 25.0 |
| Ep | エポキシ 樹脂系 | ビスフェノール A 型エポキシ樹脂 ビスフェノール F 型エポキシ樹脂 | m-キシレンジアミ 脂肪族ポリアミン | 109.0 | 2.73 |
| Ea | エポキシ アクリレート 樹脂系 | ビスフェノール A 型 エポキシアクリレート樹脂 反応性モノマー | 過酸化ベンゾイル | 198.6 | 2.23 |

表 4-3-12 母材コンクリートおよびアンカー筋の物性

| 記号 | コンクリート | | アンカー筋 | | | |
|--------|------------------------------|--------------------------------|-------|-------|------------------------------|--------------------------------|
| | 圧縮強度 (N/mm ²) | 静弾性係数 (kN/mm ²) | 径 | 種類 | 降伏強度 (N/mm ²) | 静弾性係数 (kN/mm ²) |
| In-30N | 30.4 | 27.8 | D13 | MK785 | 791 | 190 |
| Ep-30N | | | | | | |
| In-24N | 24.6 | 29.8 | | | | |
| Ea-24N | | | | | | |

表 4-3-13 クリープ試験条件

| 記号 | 接着剤種類 | 載荷荷重 (kN) | 載荷荷重比 |
|-------------|-----------------------|--------------|-------|
| In-30N-0.30 | セメント系 | 32.8 | 0.30 |
| In-30N-0.45 | | 49.1 | 0.45 |
| In-30N-0.59 | | 64.7 | 0.59 |
| Ep-30N-0.48 | エポキシ 樹脂系 | 59.1 | 0.48 |
| Ep-30N-0.54 | | 65.9 | 0.54 |
| Ep-30N-0.59 | | 72.7 | 0.59 |
| In-24N-0.34 | セメント系 | 30.6 | 0.34 |
| In-24N-0.50 | | 45.4 | 0.50 |
| In-24N-0.68 | | 61.6 | 0.68 |
| In-24N-0.72 | | 65.8 | 0.72 |
| Ea-24N-0.33 | エポキシ アクリレート 樹脂系 | 26.7 | 0.33 |
| Ea-24N-0.50 | | 40.8 | 0.50 |
| Ea-24N-0.57 | | 46.8 | 0.57 |
| Ea-24N-0.65 | | 53.5 | 0.65 |
| Ea-24N-0.72 | | 59.2 | 0.72 |

②付着強度試験

付着強度試験は、4章3節1項(2)と同様に試験を行った。反力板の口径は穿孔径の1.5-2.0倍の範囲内のφ30mmとし、測定項目は荷重、自由端および載荷端のアンカー筋の拔出量とした。

③クリープ試験

クリープ試験装置は、4章2節で検証した装置を使用した。表4-3-13にクリープ試験条件を示す。載荷荷重による影響を確認するため、載荷荷重は、最大耐力の平均値に対し0.30~0.72になるように3カ月以上持続載荷した。

(3) 試験結果および考察

① 付着強度試験結果

表 4-3-14 に付着強度試験結果を示す。付着強度 (τ_{bl}) は、最大荷重 (P_{max}) をアンカー筋の公称直径 (d_{a1}) と埋込み長さ (l_b) より求めたアンカー筋の表面積で除した値とした。

コンクリート強度 30N/mm^2 の In-30N, Ep-30N では、いずれもアンカー筋が降伏した後、アンカー筋の引き抜けが生じた。In-30N の最大耐力は 110.2kN であり、Ep-30N では 122.7kN であった。

また、コンクリート強度が 24N/mm^2 の試験体では、鉄筋が降伏する前に付着破壊を生じ、In-24N の付着強度は 25.1N/mm^2 、Ea-24N では 22.6N/mm^2 であった。なお、Ea-24N については、3 試験体のうち 1 試験体に硬化不良と見られる不具合が認められたため、付着強度の値は、残りの 2 試験体の平均値とした。

最大耐力時の自由端変位について、Ea-24N の変位は、In-24N の 2 倍以上であり、載荷端変位は 1.35 倍程度であった。Ep-30N においても、In-30N より自由端変位量は大きく、In-30N では脆性的に破壊した。

表 4-6-4 付着強度試験結果

| 試験体名 | コンクリート 圧縮強度 (N/mm^2) | 径 | | 埋込み 長さ (mm) l_b | 最大耐力 | | 付着強度 | | 最大耐力時の変位 | | | |
|--------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------|--|--------------------------------|------|--------------------------------|------|------|------|
| | | アンカー筋 (mm) d_{a1}^{*1} | 穿孔径 (mm) d_{a2} | | (kN) P_{max} | (N/mm ²) τ_{bl}^{*2} | 自由端 (mm) δF^{*3} | | 載荷端 (mm) δL^{*4} | | | |
| | | | | | | | Avg. | Avg. | Avg. | Avg. | | |
| In-30N | 30 | 12.7 | 18 | 91 | 113.3 | 110.2 | 31.2 | 30.4 | 0.05 | 0.09 | 4.90 | 4.10 |
| | | | | | 107.2 | | 29.5 | | 0.11 | | 3.36 | |
| | | | | | 110.1 | | 30.3 | | 0.13 | | 4.04 | |
| Ep-30N | | 121.7 | 122.7 | 33.5 | 33.8 | 1.29 | 1.40 | 7.69 | 7.02 | | | |
| | | 126.4 | | 34.8 | | 1.15 | | 7.14 | | | | |
| | | 119.9 | | 33.0 | | 1.77 | | 6.24 | | | | |
| In-24N | 24 | 12.7 | 18 | 91 | 90.3 | 91.0 | 24.9 | 25.1 | 0.39 | 0.43 | 1.00 | 1.08 |
| | | | | | 92.9 | | 25.6 | | 0.47 | | 1.17 | |
| | | | | | 89.7 | | 24.7 | | 0.43 | | 1.07 | |
| Ea-24N | | 81.9 | 82.0 | 22.6 | 22.6 | 0.94 | 0.96 | 1.45 | 1.45 | | | |
| | | - | | - | | - | | - | | | | |
| | | 82.1 | | 22.6 | | 0.98 | | 1.46 | | | | |

*1: アンカー筋公称径 *2: $\tau_{bl} = \pi \times \text{アンカー筋径} \times \text{埋込み長さ}$

*3: δF は最大耐力時の自由端拔出し量 *4: δL は最大耐力時の載荷端拔出し量

②クリープ試験時の載荷荷重比と変位

クリープ試験における目標荷重までの変位と付着強度試験時の荷重－変位曲線の比較図を図 4-3-16 に示す。

自由端および載荷端ともに付着強度試験時の荷重－変位曲線とクリープ試験開始時の荷重－変位曲線は、最大耐力の 1/3 程度までは、ほぼ同等の傾きであった。

30kN までの自由端の荷重変位の傾きは、In-30N-0.45 では 1072kN/mm, Ep-30N-0.48 では 651 kN/mm, In-24N-0.68 では 994kN/mm, Ea-24N-0.72 では 558kN/mm であり、無機系アンカーである In の傾きは、有機系アンカーEp, Ea の 1.5 倍以上大きな値であった。In の静弾性係数は Ep, Ea の 10 倍程度大きいものの、アンカーとしての引張剛性には、材料単体の物性値ほどの大きな差は認められなかった。

In-30N-0.59 の自由端については、付着試験結果とクリープ試験の荷重－変位曲線に若干ずれが生じた。これは、クリープ試験における荷重と変位の測定において、5kN 毎にナットでテンションロッドを固定する工程があり、この工程では、試験体に接触するため、この影響により変位に若干のずれが生じたものと考えられる。

クリープ破壊を生じた有機系アンカーの Ep-30N-0.59, Ea-24N-0.65, Ea-24N-0.72 では、目標荷重に達する前から自由端、載荷端の変位は、付着強度試験時の変位より大きな値となり、目標載荷荷重時には、付着強度試験時の 2 倍程度の大きな変位となっていた。

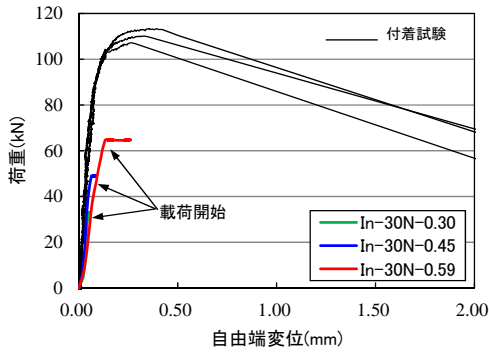
一方、クリープ破壊を起こした In-24-0.72 では、目標載荷到達時の変位と付着強度試験における変位とほぼ同等であった。

付着強度試験における載荷速度は、毎秒 $0.25 \pm 0.15 \text{N/mm}^2$ にて行い、クリープ試験では、目標荷重までの 5kN 毎に、約 5 秒の載荷時間とした。有機系アンカーEp,Ea では、高荷重域において、数秒間の持続荷重により変形量が急速に大きくなる傾向が認められた。このためクリープ試験の載荷において、高荷重域付近では荷重変位の確認を極力減らして、試験を開始するのが好ましいものと考えられる。

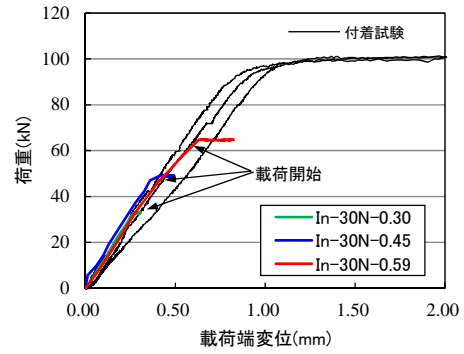
③クリープ試験載荷による影響

図 4-3-17 にクリープ試験結果を示す。載荷荷重が大きくなるほど、クリープ変形量は大きく、Ep-30N-0.59, In-24N-0.72, Ea-24N-0.65, Ea-24N-0.72 では、クリープ破壊が発生した。いずれの破壊形態も鉄筋と接着剤との界面での破壊となっていた。

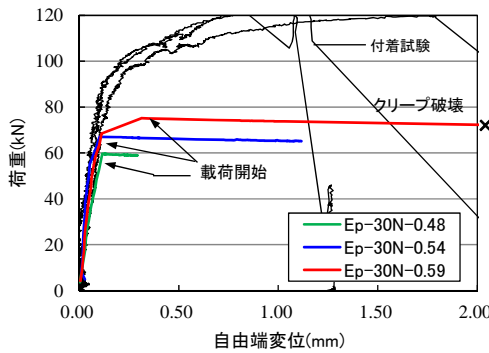
クリープ破壊が発生するまでの時間は、Ep-30N-0.59 では 1.15 日, In-24N-0.74 では 39 日, Ea-24N-0.65 では 15 時間, Ea-24N-0.72 では 5 時間であった。クリープ破壊直前の無機系アンカーの自由端変位は、1.13mm であったのに対し、有機系アンカーのクリープ破壊直前の自由端変位は、Ep,Ea とともに 3.5mm 程度であり、クリープ破壊時の変位は、付着強度試験時の最大耐力時の変位より、有機系、無機系ともに 2 倍程度大きな値で破壊していた。



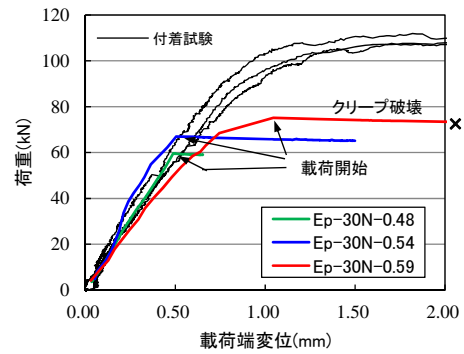
In-30Nの荷重と自由端変位



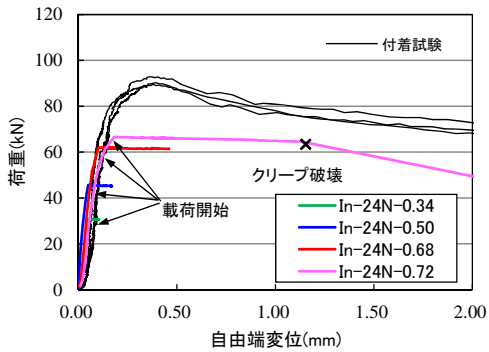
In-30Nの荷重と载荷端変位



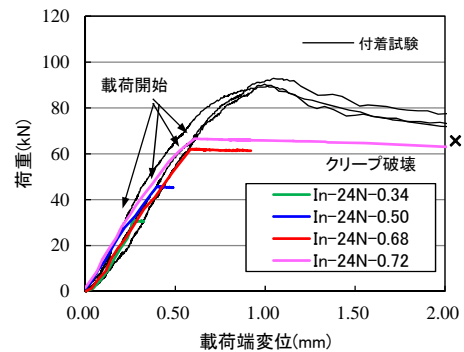
Ep-30Nの荷重と自由端変位



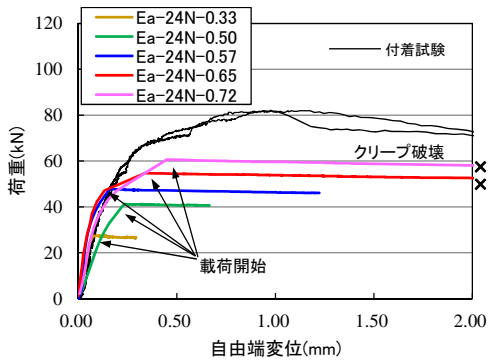
Ep-30Nの荷重と载荷端変位



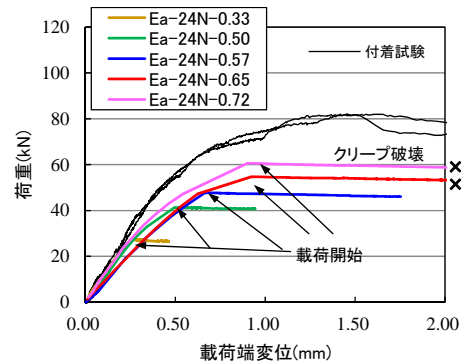
In-24Nの荷重と自由端変位



In-24Nの荷重と载荷端変位

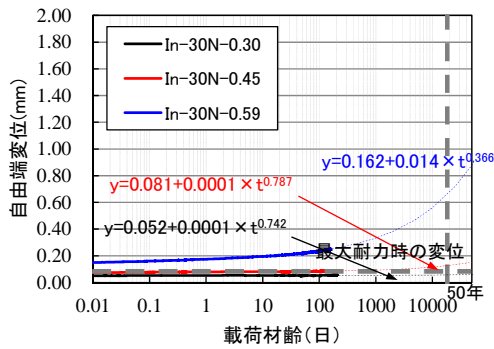


Ea-24Nの荷重と自由端変位

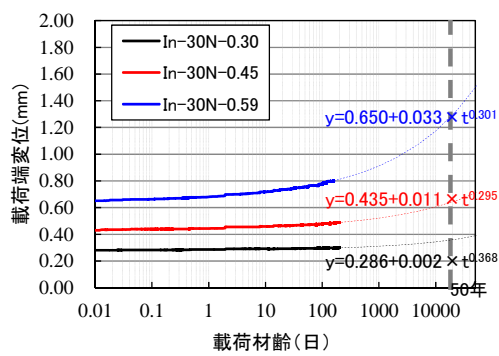


Ea-24Nの荷重と载荷端変位

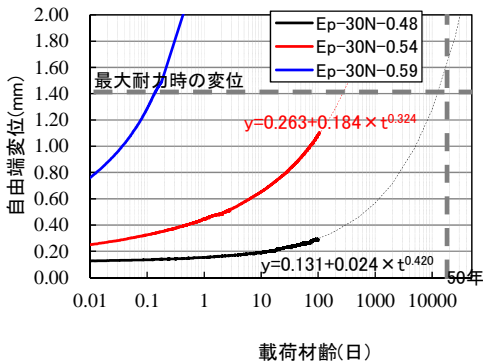
図 4-3-16 付着試験およびクリープ試験における荷重変位の関係



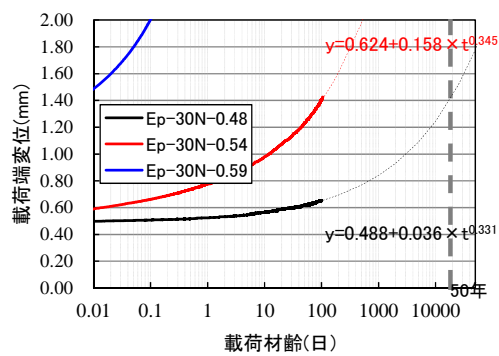
In-30Nの自由端のクリープ曲線



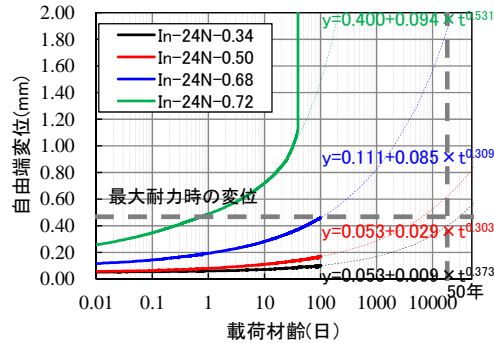
In-30Nの載荷端のクリープ曲線



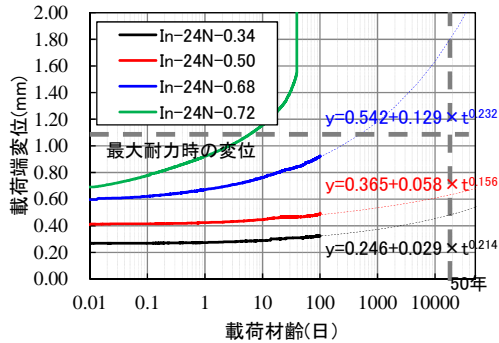
Ep-30Nの自由端のクリープ曲線



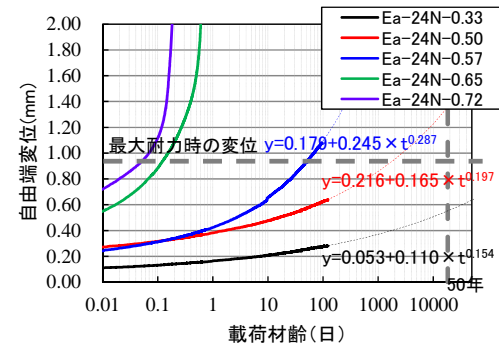
Ep-30Nの載荷端のクリープ曲線



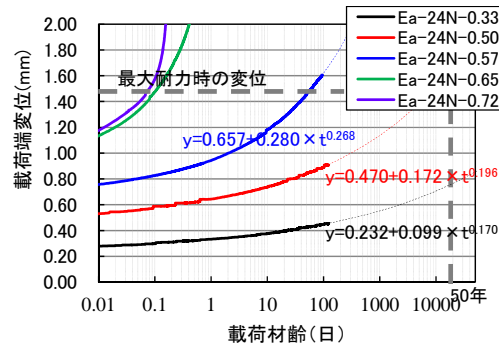
In-24Nの自由端のクリープ曲線



In-24Nの載荷端のクリープ曲線



Ea-24Nの自由端のクリープ曲線



Ea-24Nの載荷端のクリープ曲線

図 4-3-17 クリープ曲線

また、Ea-24N-0.57についても載荷材齢90日でクリープ破壊を生じなかったが、Ea-24N-0.65では15時間でクリープ破壊を生じ、載荷荷重比が約0.60以上で急激にクリープ速度が大きくなるものと推測された。

コンクリート強度の異なる無機系アンカーのIn-30NとIn-24Nを比較した場合、同程度の載荷荷重比においてコンクリート強度が低い方が、載荷材齢90日におけるクリープ変形量は大きな値であり、コンクリート強度の影響を受けていた。あと施工アンカーのクリープ変形は、母材コンクリート、コンクリート界面と接着剤、接着剤、接着剤と鉄筋の界面、鉄筋が複合的に作用する。したがって、あと施工アンカーのクリープ評価は、対象とする実構造物の強度に近いコンクリートを用いて評価を行う必要がある。また、母材コンクリートの配合やアンカー材のばらつきによるクリープ変形量への影響も考えられるため、今後これらについても検討が必要である。

長期的なクリープ変形量を推定するため、EOTA ETAG 001 Part5[4-2]に従い、長期における変位推定を行った。

付着強度試験時にアンカー筋が降伏しなかったIn-24NとEa-24Nについて自由端と載荷端の両者において最大耐力時の変位に達する時間の推定を行った。In-24Nにおいて、付着強度試験における最大耐力時の自由端変位である0.43mmに達する時間は、In-24N-0.34では64年、In-24N-0.50では13年で到達すると推定される。一方、載荷端の変位が最大耐力時の変位1.08mmに到達する時間は、In-24N-0.34、In-24N-0.54ともに1万年以上と計算され、載荷端側から求めた推定値と自由端側から求めた推定値に、著しく大きな差が生じた。

Ea-24Nにおいて、Ea-24N-0.33の変位が最大耐力の変位に達する期間は、自由端より算出した推定式で2400年、載荷端から算出した推定式では7300年、Ea-24N-0.50において自由端では5.7年、載荷端側では、20年と計算され、いずれも自由端側が小さく推定される結果となった。

クリープ変形量の大きいEa-24N-0.57では、自由端0.15年、載荷端0.14年と推定されほとんど同じ値となった。

これらの結果で無機系アンカーは、載荷端側と自由端側の推定値に大きな差が生じた。無機系アンカーでは、載荷端変位と自由端変位の差が有機系アンカーに比べ大きい。載荷端側の変形は、クリープ変形だけでなくアンカー筋の伸び量も含んでおり、付着試験時の載荷荷重とクリープ試験時の載荷荷重が異なるため、載荷端側ではクリープ試験時のアンカー筋の伸び量は、付着試験時より小さな値となる。これらの原因により載荷端側と自由端側の推定値に大きな差が生じたことが考えられる。

このため、載荷端側でクリープ破壊時間の推定を行う場合は、付着試験時およびクリープ試験時の鉄筋の伸び量を補正した変位の値を用いる必要がある。

また、変形量の推定式が、指数型で評価しているため、破壊推定変位がわずかな変化量が、破壊推定時間を大きく変化させ、クリープ変形量が小さな無機系アンカーでは、誤差が大きくなるものと考えられる。

表 4-3-15 載荷材齢 20 日から 90 日までの自由端変位変化量

| 記号 | 接着剤種類 | 自由端変位(mm) | | |
|-------------|-----------------------|-----------|------------|------------|
| | | 載荷材齢 | | |
| | | 20 日 | 90 日 | 変化量*1 |
| In-30N-0.30 | セメント系 | 0.052 | 0.052 | 0.000 |
| In-30N-0.45 | | 0.082 | 0.084 | 0.002 |
| In-30N-0.59 | | 0.204 | 0.232 | 0.028 |
| Ep-30N-0.48 | エポキシ 樹脂系 | 0.218 | 0.290 | 0.072 |
| Ep-30N-0.54 | | 0.750 | 1.058 | 0.308 |
| Ep-30N-0.59 | | - | - | - |
| In-24N-0.34 | セメント系 | 0.080 | 0.100 | 0.020 |
| In-24N-0.50 | | 0.124 | 0.166 | 0.042 |
| In-24N-0.68 | | 0.324 | 0.450 | 0.126 |
| In-24N-0.72 | | 0.846 | (1.793) *2 | (0.490) *2 |
| Ea-24N-0.33 | エポキシ アクリレート 樹脂系 | 0.226 | 0.272 | 0.046 |
| Ea-24N-0.50 | | 0.514 | 0.618 | 0.104 |
| Ea-24N-0.57 | | 0.756 | 1.066 | 0.310 |
| Ea-24N-0.65 | | - | - | - |
| Ea-24N-0.72 | | - | - | - |

*1：載荷材齢 90 日と 20 日の差

*2：クリープ曲線からの推定値

表 4-3-15 に載荷材齢 20 日から 90 日までの自由端変位変化量の結果を、図 4-3-18 に載荷材齢 20 日から 90 日までの自由端変位の変化量と載荷荷重比の関係を示した。

有機系アンカーでは載荷荷重比 0.5 以上で、無機系アンカーでは載荷荷重比 0.6 から 0.7 以上で自由端の変化量が急激に増加した。

急激に変化量が大きくなる過程では、材料内部で分子、結晶の状態が変化しているものと推定され、変化が大きくなる場所で、マイクロクラック等の発生が始まっているものと推測される。そのため、変化量の小さなものは、長期持続載荷において、変位は一定となり、変化量の大きいものはクリープ破壊が発生するものと推測される。

クリープ破壊を起こさない限界の荷重であるクリープ限度が、急激に変位の変化量が増加する前の載荷荷重比であると仮定した場合、今回使用した有機系アンカーのクリープ限度は載荷荷重比 0.5 程度、無機系アンカーのクリープ限度は 0.6 から 0.7 程度と推定される。

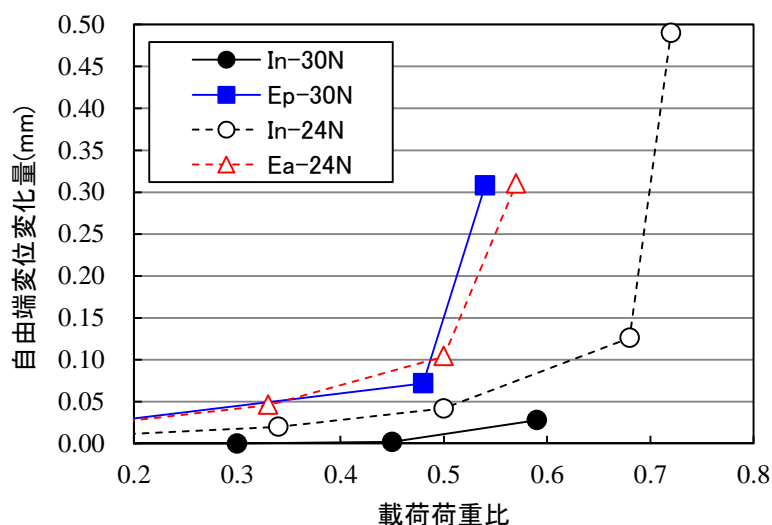


図 4-3-18 載荷荷重比と自由端変位変化量

また、今回使用した材料の付着強度は比較的高いものであり、Ep-30N、In-30N の荷重比 0.5~0.6 程度では 60kN 程度の持続荷重となる。コンクリート強度 46N/mm² 程度の先付けアンカーの最大耐力は、50kN 程度であるため、60kN 程度の載荷において母材コンクリートのマイクロクラック発生の影響により変位量が急速に増加したことも考えられる。クリープ限度は、材料の特性値であり、各材料のクリープ限度を推定するためには、クリープ破壊試験を行いクリープ破壊線図からクリープ限度を推測することが考えられ、今回の実験値の推定方法の妥当性を確認する必要がある。

(4) まとめ

無機系注入式アンカーと有機系注入式アンカーのクリープ挙動の比較を行い、以下の知見を得た。

- 1) 有機系アンカーでは、載荷載荷荷重比が 0.6 以上で、数秒の持続荷重時間で変形量が急速に大きくなる傾向であり、クリープ試験においても載荷荷重比 0.6 以上ではクリープ限度以上と推定された。
- 2) ACI, ETAG の評価基準で無機系アンカーを評価した場合、載荷端側と自由端側の推定値に大きな差が生じることが判明した。
- 3) クリープ破壊が生じない限界の荷重であるクリープ限度を急激に変位変化量が増加する直前の載荷荷重比であると仮定した場合、無機系アンカーのクリープ限度は載荷荷重比 0.6~0.7 程度、有機系アンカーのクリープ限度は載荷荷重比 0.5 程度であるものと推定された。

4.4 クリープ評価方法の検討

4.4.1 目的

ACI355-4[4-3]（以下、ACI 基準と記す）、EOTA ETAG 001 Part5[4-2]（以下、ETAG 基準と記す）において、長期持続载荷におけるクリープ変形量の推定は、一定の载荷荷重下においてクリープ変形量を測定し、クリープ曲線を外挿する方法により行われている。ACI 基準、ETAG 基準におけるクリープ試験結果から長期の変位予測式は、プラスチックのクリープ変形に基づいたものを適用している。これは、有機系あと施工アンカーの使用を前提としており、材料特性の異なる無機系あと施工アンカーについて、これらの基準をそのまま適用してよいのか検討する必要がある。

コンクリートの圧縮クリープ試験は、JIS A1157（コンクリートの圧縮クリープ試験）に規定されており、载荷応力度は圧縮強度の 1/3 における試験結果を用いて、クリープ曲線を調べ、ACI 基準、ETAG 基準とは異なる推定式によりクリープ曲線式を算出することとしている。

クリープ寿命の推定方法の一つとして、高応力側で短時間のクリープ破壊時間データを調べ、クリープ破壊線図から低応力側のクリープ寿命を外挿して予想する方法がある。この方法を適用したあと施工アンカーの寿命推定については、ほとんど行われていない[4-8]。

ここでは、4章3節で検討した先付けアンカー、無機系および有機系の注入式あと施工アンカーの結果を用いて、クリープ曲線式からの評価、クリープ破壊線図からの評価、クリープ速度による評価を行い、これらの評価方法の適用可能性を目的として検討を行った。

4.4.2 クリープ評価

(1) 試験条件

クリープ評価方法の検討におけるデータには、4章3節1項の先付けアンカー、4章3節4項の無機系アンカー（InB）およびエポキシアクリレート樹脂系アンカー（OrB）の自由端と载荷端の変位値を用いた。クリープ試験における変位の値は、载荷直後の変位の値を 0mm としたものに、付着強度試験時の荷重－変位曲線における载荷荷重の変位の平均

表 4-4-1 母材コンクリートおよびアンカー筋の物性

| 記号 | アンカー種類 | コンクリート | | アンカー | | | |
|-----|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|------|-------|------------------------------|--------------------------------|
| | | 圧縮強度 (N/mm ²) | 静弾性係数 (kN/mm ²) | 径 | 種類 | 降伏応力 (N/mm ²) | 静弾性係数 (kN/mm ²) |
| CIP | 先付けアンカー | 24.3 | 28.4 | D13 | MK785 | 791 | 190 |
| InB | 超速硬セメント系 注入式アンカー | | | | | | |
| OrB | エポキシアクリレート 樹脂系アンカー | 24.6 | 29.8 | | | | |

表 4-4-2 クリープ試験条件

| 試験体 | 載荷荷重 (kN) | 載荷荷重比 |
|----------|-----------|-------|
| CIP-0.33 | 15.2 | 0.33 |
| CIP-0.65 | 29.8 | 0.65 |
| CIP-0.69 | 31.7 | 0.69 |
| CIP-0.86 | 39.8 | 0.86 |
| InB-0.32 | 29.9 | 0.32 |
| InB-0.63 | 58.7 | 0.63 |
| InB-0.79 | 73.5 | 0.79 |
| InB-0.90 | 83.7 | 0.90 |
| InB-0.93 | 87.1 | 0.93 |
| InB-0.95 | 89.0 | 0.95 |
| OrB-0.33 | 26.7 | 0.33 |
| OrB-0.50 | 40.8 | 0.50 |
| OrB-0.57 | 46.8 | 0.57 |
| OrB-0.65 | 53.5 | 0.65 |
| OrB-0.72 | 59.2 | 0.72 |

表 4-4-3 付着強度試験結果

| 試験体 | 径 | | | 埋込み長さ (mm) l_b | 最大耐力 | | 付着強度 | | 最大耐力時の変位 | | | |
|-----|--------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------|---|---------------------------|------|---------------------------|----------|------|------|------|
| | アンカー (mm) d_{a1} | 穿孔径 (mm) d_{a2} | 最大耐力 (kN) P_{max} | | 付着強度 (N/mm ²) τ_{bl} | 自由端 (mm) δF | | 載荷端 (mm) δL | | | | |
| | | | | | | Avg. | Avg. | Avg. | Avg. | | | |
| | | | | | | | | | | Avg. | Avg. | |
| CIP | ① | 12.7 | - | 91 | 43.5 | 46.2 | 12.0 | 12.7 | 0.83 | 0.81 | 1.12 | 1.14 |
| | ② | | | | 46.5 | | 12.8 | | 0.84 | | 1.18 | |
| | ③ | | | | 48.5 | | 13.3 | | 0.76 | | 1.11 | |
| InB | ① | 12.7 | 18 | 91 | 102.2 | 93.5 | 28.2 | 25.7 | 0.48 | 0.35 | 1.47 | 1.14 |
| | ② | | | | 89.0 | | 24.5 | | 0.27 | | 0.87 | |
| | ③ | | | | 89.2 | | 24.6 | | 0.30 | | 1.08 | |
| OrB | ① | 12.7 | 16 | 91 | 81.9 | 82.0 | 22.6 | 22.6 | 0.94 | 0.96 | 1.45 | 1.38 |
| | ② | | | | - | | - | | - | | 1.23 | |
| | ③ | | | | 82.1 | | 22.6 | | 0.98 | | 1.46 | |

値を加えた

ものとした。表 4-4-1 に評価を行った試験体の母材コンクリートおよびアンカー筋の物性を、表 4-4-2 にクリープ試験条件を、表 4-4-3 に付着強度試験結果を示す。付着強度は、最

大耐力を鉄筋の表面積で除した値とした。

(2) クリープ曲線からのクリープ変形量推定

クリープを定量的に扱うために、クリープ試験結果から得られた結果より、数学的に表現する必要があるため、クリープ曲線を予測として、様々な表示法が提案されている。ここでは、ETAG 基準で使用されている式(4-1)とコンクリートの圧縮クリープ(JIS A1157) [4-9]で使用される式(4-2) (以下、JIS 基準と記す) について、適合性について検討を行った。

$$S(t) = S(0) + a \cdot t^b \quad \text{式 (4-1)}$$

$$S(t) = A \cdot \log e(t+1) + B \quad \text{式 (4-2)}$$

ここに、
 $S(t)$: 時間 t における変位量
 $S(0)$: 載荷直後における変位量
 t : クリープ開始後の時間
 a, b, A, B : 実験によって求める定数

図4-4-1、表4-4-4にクリープ曲線の推定式の算出結果を示す。ETAG基準に従い、式の定数の算出に使用したデータは、試験結果の最終20日間以上のデータである載荷開始から20日以降の値とし、最小二乗法により算出した。

ETAG基準による評価では、式(1)による推定式より50年後の変位を外挿推定し、付着強度試験における最大耐力時の平均変位未満であることを確認することとしている。これに従い、CIP、InB、OrB の評価を行った。CIP-0.33、OrB-0.33の自由端および載荷端からの推定結果は、最大耐力時の平均変位未満を満足しており、いずれもクリープ破壊発生の可能性は小さいものと推定された。一方、InB-0.32においては、自由端からの推定では載荷材齢50年における変位は0.35mmと推定され、最大耐力時の平均変位と同等であり、クリープ破壊が発生する可能性があるものと評価された。しかし、載荷端からの推定結果では、載荷材齢50年における変位は0.64mmであり、付着強度試験時の変位である1.14mmの1/2程度であり、クリープ破壊が発生する可能性は小さいものと推定された。

InBの自由端と載荷端でのクリープ破壊発生評価が異なった理由としては、付着試験時の自由端の変位が非常に小さいため、わずかな変位の測定誤差が推定式の算出に影響すること、クリープ曲線の適用した推定式が材料の評価に適していないこと等が考えられる。

ETAG基準では、付着強度試験最大耐力時の変位をクリープ破壊変位として算出しているが、クリープ破壊時の変位は、付着強度試験の値より大きな値であり、付着強度試験の変位に達する時間からのクリープ破壊評価は、より安全側の評価となる。しかし、付着強度試験時の最大耐力の変位が小さいものへ適用する場合には、評価が過大評価となってい

る可能性もあり、過大評価になっていないか検証が必要である。

ETAG基準とJIS基準の推定式について、荷重材齢50年における式(1)の推定値は、式(2)の推定値の1.3倍程度変位は大きな値として計算された。適用する式により評価結果に大きな違いが出ることが推測されるため、クリープ曲線からの評価においては、クリープ破壊の想定変位および材料に適した推定式を設定する必要がある。これらの評価については、

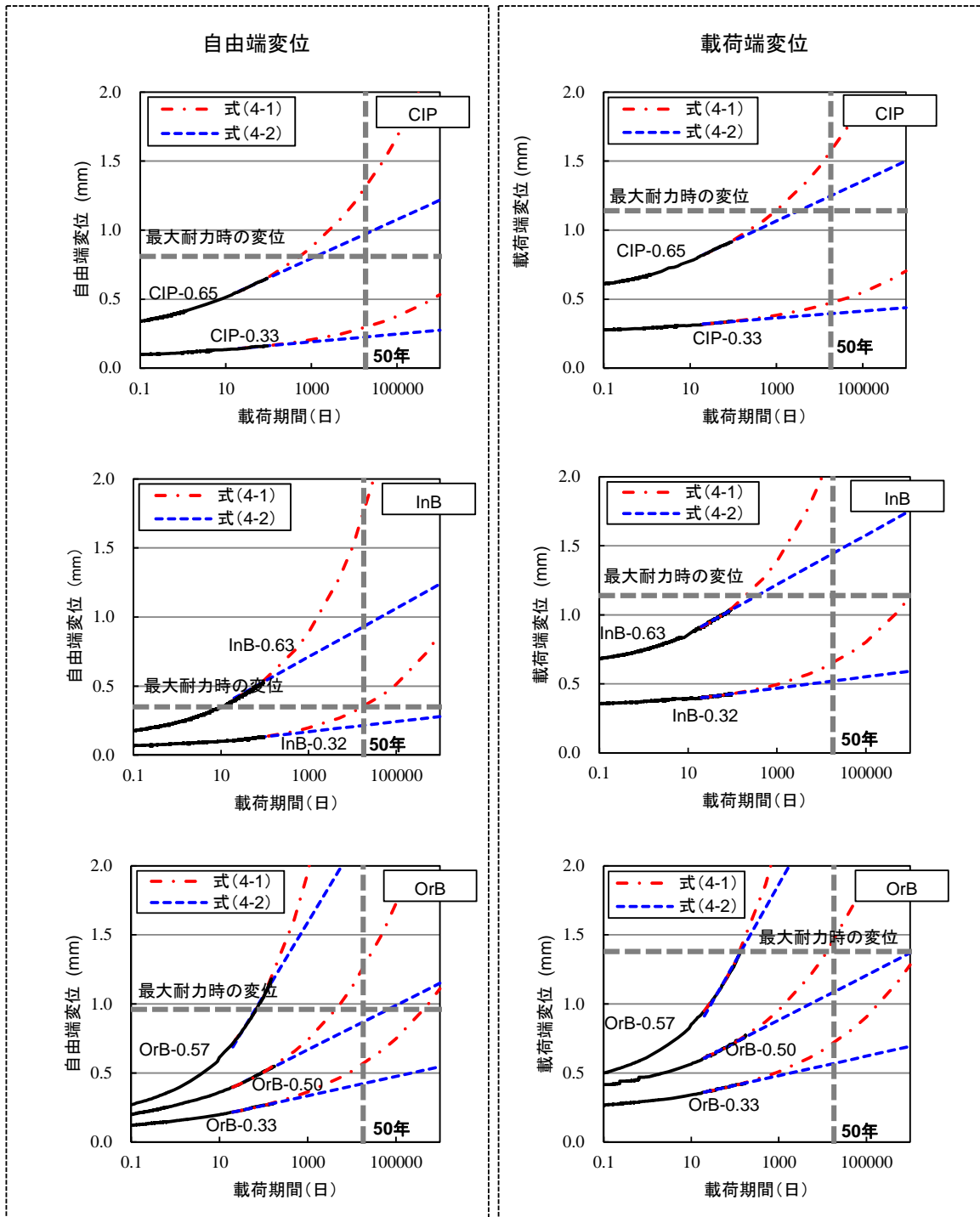


図 4-4-1 クリープ曲線

表 4-4-4 クリープ推定式

| | | 自由端の値から求めた推定式 | 載荷端の値から求めた推定式 |
|----------|---------|-----------------------------------|----------------------------------|
| CIP-0.33 | 式 (4-1) | $S(t) = 0.085 + 0.0329t^{0.189}$ | $S(t) = 0.26 + 0.0343t^{0.185}$ |
| | 式 (4-2) | $S(t) = 0.0123\log_e(t) + 0.106$ | $S(t) = 0.0109\log_e(t) + 0.288$ |
| CIP-0.65 | 式 (4-1) | $S(t) = 0.220 + 0.1989t^{0.173}$ | $S(t) = 0.488 + 0.199t^{0.174}$ |
| | 式 (4-2) | $S(t) = 0.0611\log_e(t) + 0.374$ | $S(t) = 0.0627\log_e(t) + 0.634$ |
| InB-0.32 | 式 (4-1) | $S(t) = 0.055 + 0.0244t^{0.255}$ | $S(t) = 0.335 + 0.0323t^{0.232}$ |
| | 式 (4-2) | $S(t) = 0.0159\log_e(t) + 0.0590$ | $S(t) = 0.0178\log_e(t) + 0.346$ |
| InB-0.63 | 式 (4-1) | $S(t) = 0.135 + 0.1240t^{0.261}$ | $S(t) = 0.628 + 0.132t^{0.253}$ |
| | 式 (4-2) | $S(t) = 0.0764\log_e(t) + 0.183$ | $S(t) = 0.0776\log_e(t) + 0.683$ |
| OrB-0.33 | 式 (4-1) | $S(t) = 0.084 + 0.0753t^{0.189}$ | $S(t) = 0.231 + 0.0731t^{0.193}$ |
| | 式 (4-2) | $S(t) = 0.0304\log_e(t) + 0.124$ | $S(t) = 0.0307\log_e(t) + 0.268$ |
| OrB-0.50 | 式 (4-1) | $S(t) = 0.126 + 0.1452t^{0.209}$ | $S(t) = 0.331 + 0.152t^{0.205}$ |
| | 式 (4-2) | $S(t) = 0.0697\log_e(t) + 0.186$ | $S(t) = 0.0703\log_e(t) + 0.397$ |
| OrB-0.57 | 式 (4-1) | $S(t) = 0.154 + 0.229t^{0.298}$ | $S(t) = 0.381 + 0.232t^{0.299}$ |
| | 式 (4-2) | $S(t) = 0.230\log_e(t)$ | $S(t) = 0.2440\log_e(t) + 0.183$ |

4章4節2項(4)で検証する。

(3) クリープ限度の推定

コンクリートのクリープにおいて、低持続応力下と高持続応力下ではクリープ生成機構が異なると言われており、高荷重域においては、材料内部でマイクロクラック等が生じてはじめて、その後時間とともにクラック等が生長[4-10]していくものと考えられる。ここでは、クリープ変形速度が急激に大きくなる載荷荷重比が材料内部でマイクロクラックが発生し始める点と考え、この荷重をクリープ限度であると仮定し、クリープ限度の推定を行った。

図4-4-2に載荷荷重比と載荷材齢90日における自由端変位の関係を示す。ここでの変位は、目標荷重到達直後の変位を0mmとした変位とした。

CIPとInBでは、載荷荷重比0.6程度までの載荷荷重比と変位の関係は、ほぼ同じであった。OrBの載荷荷重比に対する変位の増加量は、CIP、InBより大きく、材料特性の差により載荷応力に対する変位に差が生じたものと考えられる。4章3節4項で、定常クリープ域で急激に変位が大きくなる荷重から、無機系注入式あと施工アンカーのクリープ限度を0.6~0.7程度、有機系あと施工アンカーのクリープ限度を0.5程度と推定した。図4-4-2より、CIP、InBの載荷荷重比0.6~0.7およびOrBの載荷荷重比0.5程度における載荷材齢90日における変位は、0.4~0.5mmである。これらの材料においては、目標荷重到達直後からの載荷材齢90日における変位増加量が0.4~0.5mmより小さい場合の載荷荷重は、クリープ限度以下と判断されるため、クリープ破壊の可能性が小さいものと推定される。図4-4-3にクリープ破壊線図を、図4-4-4にクリープ破壊線図中の記号に対応するクリープ曲線の模式図を

示す。 図4-4-3において、クリープ破壊が発生しない載荷荷重比がクリープ限度であり、クリープ破壊線図中のCとDの間の載荷荷重がクリープ限度となる。図4-4-4は、図4-4-3の図中に示した記号に対応するクリープ曲線を示している。クリープの評価方法として、アンカーの載荷荷重とクリープ変形量の関係が、図4-4-2と同様の傾向を示すならば、図4-4-4におけるD点の載荷材齢90日における変位が、0.4~0.5mm以下であれば、クリープ限度以下であると判断することが可能と推測される。

(4) クリープ破壊線図からの推定

クリープ破壊寿命を予測する方法として、式(4-3)の応力とクリープ破壊時間の関係より高応力側での短時間クリープ破壊データより低応力側のクリープ破壊寿命を直線外挿して予測する方法によりクリープ破壊時間の推定を行った。同時にクリープ曲線からのクリープ変形推定との比較を行った。

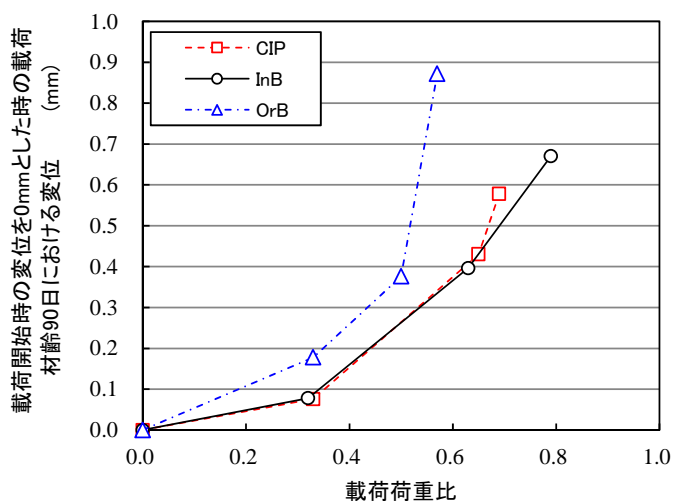


図 4-4-2 載荷荷重比と90日における変位

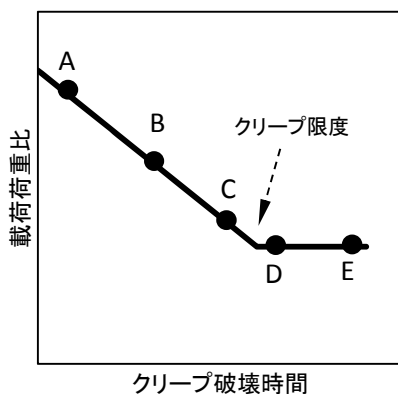


図 4-4-3 クリープ破線図 模式図

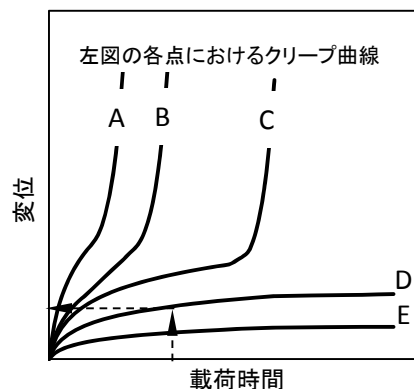


図 4-4-4 クリープ曲線 模式図

$$\log t = A - B \sigma \quad \text{式 (4-3)}$$

ここに、
 t : クリープ開始後の時間
 σ : 応力
 A, B : 実験によって求める定数

図4-4-5, 図4-4-6に載荷荷重比と破壊に至るまでの時間の関係であるクリープ破壊線図を示す。図中に付着強度試験の結果を、載荷荷重比を 1.0, 載荷時間は3分と仮定してプロットした。

図4-4-5, 図4-4-6に式(4-1), 式(4-2)から求めた結果を加えた。図4-4-5では、付着試験最大耐力時の変位に達する時点をプロットし、図4-4-6ではクリープ限度における載荷90日における変位、すなわち推定したクリープ限度に相当する荷重の変位に載荷材齢90日における目標荷重到達直後からの変位増加量の0.5mmを加えた変位に達する時点をプロットした。この変位は、CIPで0.72mm, InBで0.63mm, OrBで0.63mmであり、InBでは付着強度試験時の最大耐力時の変位の1.8倍であり、OrBでは0.65倍であった。

クリープ破壊時のデータから求めたクリープ破壊推線図において、InBの時間に対する載荷荷重比に対する傾きは、OrBの1/3程度であった。CIPとInBはいずれも無機系材料であるため、傾きには大きな差は生じないものと推定していたが、InBの傾きはCIPの2/3程度小さな値となった。InBの付着強度試験では、1試験体のみ大きな付着強度となっており、載荷荷重比の計算値に、付着強度試験結果の平均値を使用しているため、クリープ破壊線図の傾きが小さく算出された可能性がある。また、コンクリートのクリープ破壊時間には、ばらつきが大きいと言われており[4-10]、クリープ破壊時間からの評価においては、多くの試験数が必要であると考えられる。これらのことからクリープ破壊推線図からの推定においては、付着強度試験結果のばらつきとクリープ破壊時間のばらつきの両者を考慮し、評価を行う必要がある。

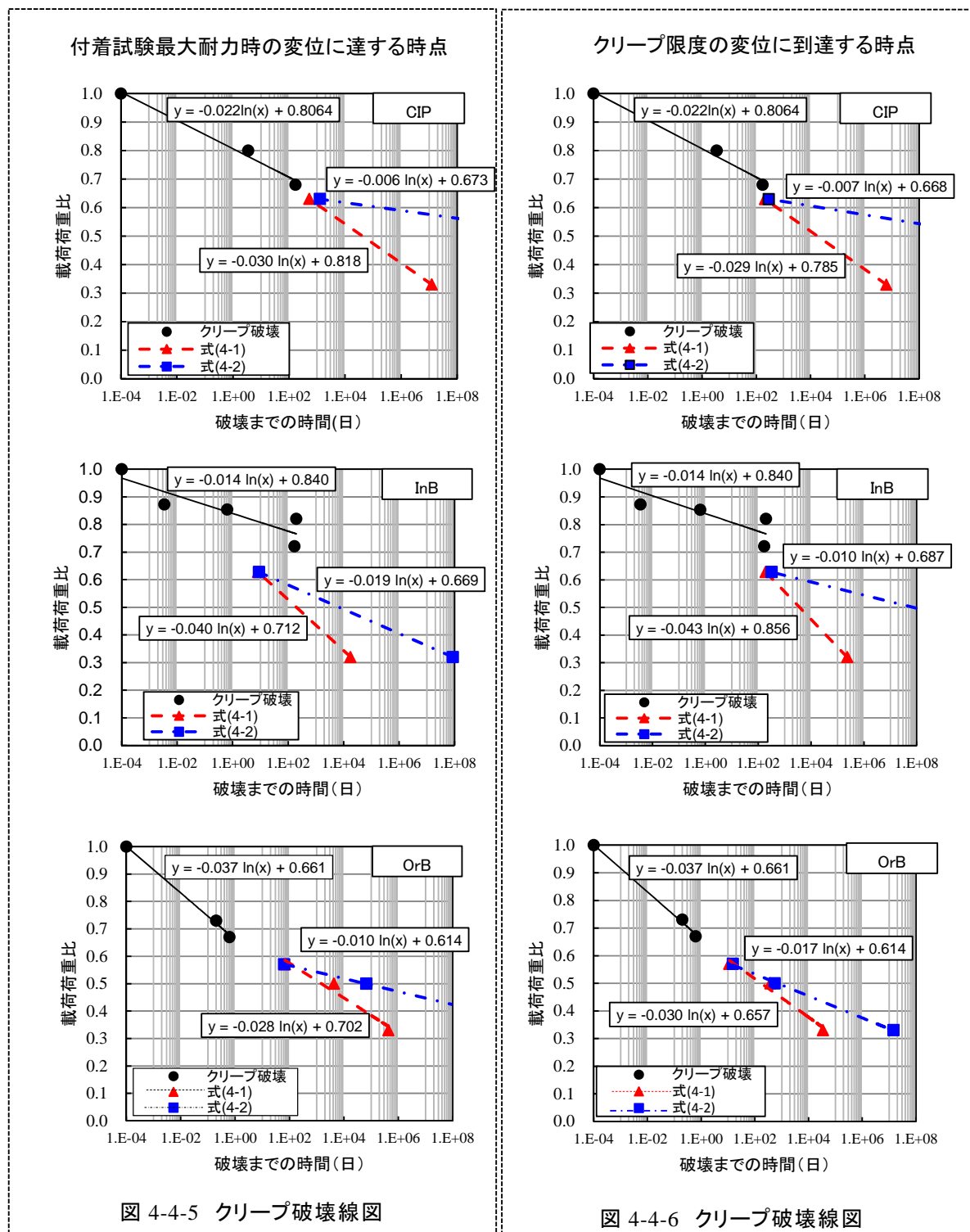
クリープ変位推定式の式(4-1)と式(4-2)について、図4-4-5, 図4-4-6における式(4-1), 式(4-2)より算出した式が、クリープ破壊線図の推定式と近似しているものが好ましいと考えられる。そこで、クリープ破壊線図の推定式と式(4-1), 式(4-2)の比較を行った。

付着強度試験時の最大耐力時の変位に達する時間で算出した図4-4-5において、InBでは載荷荷重比0.6程度の推定式のプロットが、クリープ破壊線図の外挿線上より大きなずれを生じた。クリープ限度に相当する載荷荷重における90日の変位に達する時間で算出した図4-4-6では、InB, OrBでは載荷荷重比0.6程度のプロットのクリープ破壊線図の外挿線上からずれば、図4-4-5より小さくなった。

これより、クリープ破壊時間の推定に適用する変位を適切に設定することが重要であり、付着強度試験最大耐力時の変位を適用するより、クリープ限度の荷重における一定載荷材

齢時の変位を用いる方が、適切であるものと推定された。このクリープ破壊推定に適用する変位については、今後更に検討が必要である。

図4-4-6において、クリープ破壊線図の推定式は、InBでは、式(4-1)の傾きは同等であり、



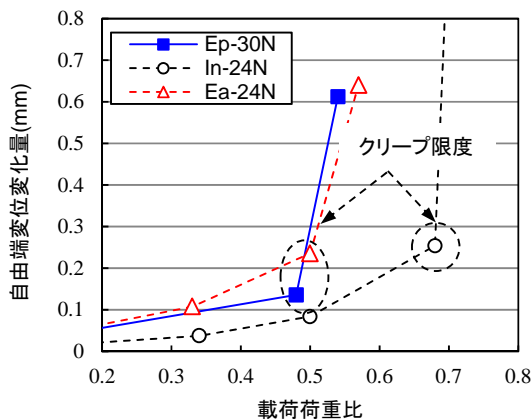


図 4-4-7 載荷荷重比と自由端変位変化量

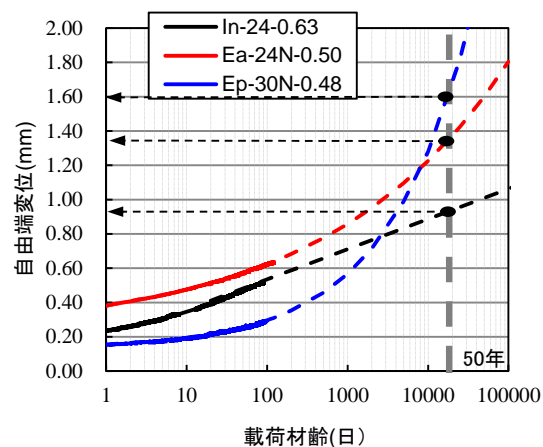


図 4-4-8 クリープ限度におけるクリープ曲線

式(4-2)の傾きは大きな差を生じた。クリープ破壊線図と推定式の直線性に若干のずれが生じたが、破壊時間の推定に適用する変位を適切に設定することによりこのずれはさらに減少するものと考えられる。OrBでは式(4-1)がクリープ破壊線図の推定式とほぼ同等となった。これらのことから、剛性の高い無機系注入式あと施工アンカー材のクリープ予測としては、変位量が指数的に増加しないJIS基準等に用いられている対数関数による推定式の方が好ましく、有機系あと施工アンカーでは、ETAG 基準で適用している式(1)はプラスチックのクリープ変形に基づいた予測式の適用が好ましいものと考えられる。

このことを検証するために、4章3節4項で実施した試験結果を用い、クリープ限度におけるクリープ曲線からの載荷材齢50年における変位の推定を行った。図4-4-7に載荷荷重比と自由端の変位変化量の関係を示す。有機系アンカーのEp-30NとEa-24Nでは、載荷荷重比0.5程度がクリープ限度と推定され、無機系アンカーのIn-24Nでは載荷荷重比0.7程度がクリープ限度と推定される。このクリープ限度におけるクリープ曲線を図4-4-8に示す。In-24Nでは、対数関数による式(4-2)を用い、Ea-24N、Ep-30Nでは指数関数の式(4-1)を用いて、50年後の変位を推定した。

その結果、載荷材齢50年における変位は、In-24Nでは、0.9mm、Ea-24Nでは1.3mm、Ep-30Nでは1.6mmであり、最大耐力時の変位の1.5から2.5倍程度の変位となった。これまでの試験におけるクリープ破壊時の変位は、最大耐力時の変位の2~3倍程度であったことから、有機系あと施工アンカーに対して式(4-1)の適用が、無機系あと施工アンカーに対しては、式(4-2)が適当であることが確認された。

(5) クリープ速度による評価

クリープは、ひずみの状況から、遷移クリープ、定常クリープ、加速クリープの3段階に分けられる[4-9]。ここでは、定常クリープ時のクリープ速度より定常クリープ域で適用されるNorton 則に従い[4-9]、クリープ指数の推定を行った。式(4-4)にNorton式を、表

4-4-5に定常クリープ時のクリープ速度を示し、図4-4-9にクリープ速度と荷重の関係を示す。

$$\varepsilon_c = A \cdot \sigma^n \quad \text{式 (4-4)}$$

ここに、 ε_c : クリープ速度
 σ : 応力
 A : クリープ定数
 n : クリープ指数

一定の温度下において、定常クリープ速度と応力の対数に対して直線関係が成立すれば、

表 4-4-5 載荷荷重比とクリープ速度

| | 載荷荷重比 | 荷重 (kN) | 自由端変位 (mm) | | クリープ速度 (mm/day) |
|-----|-------|------------|---------------|--------|--------------------|
| | | | 20days | 90days | |
| CIP | 0.33 | 15.1 | 0.14 | 0.16 | 0.00029 |
| | 0.63 | 28.7 | 0.55 | 0.65 | 0.00137 |
| | 0.68 | 30.7 | 0.65 | 0.85 | 0.0028 |
| InB | 0.32 | 29.9 | 0.11 | 0.13 | 0.00037 |
| | 0.63 | 58.7 | 0.41 | 0.53 | 0.0018 |
| | 0.79 | 72.6 | 0.58 | 0.83 | 0.00354 |
| | 0.9 | 82.5 | 0.61 | 0.88 | 0.00389 |
| OrB | 0.33 | 27.0 | 0.22 | 0.26 | 0.00066 |
| | 0.5 | 41.0 | 0.40 | 0.50 | 0.00149 |
| | 0.57 | 47.1 | 0.72 | 1.03 | 0.00434 |

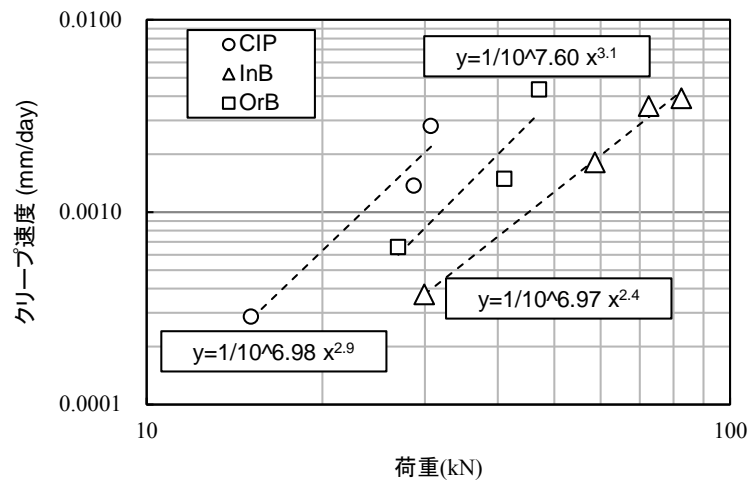


図4-4-9 クリープ速度と荷重

その応力域でのクリープは、べき乗則クリープと呼ばれる[4-9]。今回の試験において、試験数が少ないため、どの応力範囲まで直線関係が成立しているのか詳細は不明であるものの、ここでは、表4-4-5における範囲においてはべき乗則が成立するものとして、表4-4-5の結果より最小二乗法によりクリープ指数を算出した。

CIPのクリープ指数は2.9、InBは2.4、OrBは3.1であり、応力に対するクリープ変形速度は、材料により若干異なったが、今回使用したアンカー材料のクリープ指数は、20℃の常温において、およそ3程度であることが判明した。クリープ指数は、材料により一定の値を持つと言われており[4-9]、OrBはInBより、クリープ指数が大きくなっており、あと施工アンカーにおいても、クリープ指数を用いて、材料ごとにクリープ特性の評価が可能であるものと推測された。今後、さらなるデータの蓄積により、べき乗則の適用可能な範囲を明確にすることで、長期におけるクリープ変形量の予測が可能であるか検討が必要である。

4. 4. 4 まとめ

接着系あと施工アンカーに対するクリープ試験を行い、クリープ評価方法を検討し以下の知見を得た。

- 1) 無機系注入式あと施工アンカーのクリープ評価をEOTA ETAG 001 Part5に従い評価したところ、自由端からの評価と載荷端からの評価では評価結果が大きく異なった。これは、付着試験時の変位が小さいため、試験体のバラツキや推定式の誤差により、極わずかな差がクリープ破壊発生の推定時間に大きな影響を及ぼすためと考えられる。
- 2) クリープ曲線から長期におけるクリープ変形量を指数関数および対数関数により推定を行った場合、載荷材齢50年において、指数関数により推定した値は、対数関数で推定した値の1.3倍程度大きな変形量の推定値となる。
- 3) クリープ曲線からの変位推定において、無機系注入式あと施工アンカーでは対数関数を、有機系アンカーでは指数関数を適用が適当である。
- 4) 定常クリープ域で適用されるNorton 則のあと施工アンカーのクリープ指数は、20℃の常温において、およそ3程度である。

4.5 あと施工アンカーのクリープ試験方法および評価方法の提案

接着系あと施工アンカーの試験方法評価方法および評価方法について、4章2節、3節、4節で得られた結果をもとに試験方法および評価方法を提案する。

4.5.1 クリープ評価方法の考え方

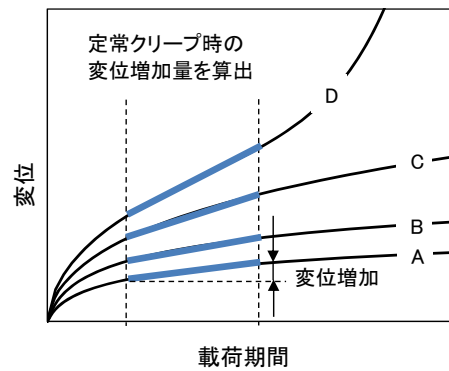
本研究においてクリープを評価する上でクリープ限度が重要な指標になることを示してきた。ここでは、あと施工アンカーの長期持続荷重に対し、本研究から得られた結果をもとにしたクリープ評価方法の考え方を図4-5-1に示す。

(1) クリープ試験

①4水準以上の載荷荷重比で
クリープ試験を実施

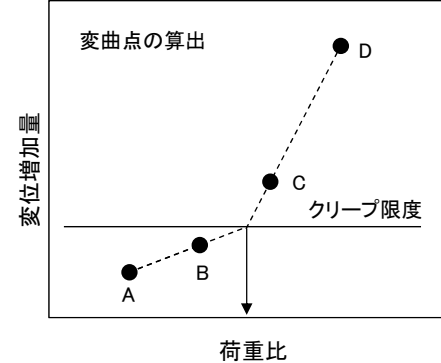
載荷荷重比(%)
有機系アンカー
A 40-46 B 46-52 C 52-58 D 58-64
無機系アンカー
A 40-50 B 50-60 C 60-70 D 70-80

②定常クリープ域において、
変位増加量を算出



(2) クリープ限度の算出

③載荷荷重比と変位増加量の関係より、
クリープ限度の算出



(3) 設計耐用年数における変位量の推定

④クリープ限度以下における
試験値からの推定式の算出

⑤設計耐用年数時の
変位量を算出

50年相当のクリープ変位と付着試験時の変位を比較確認。
・付着試験時最大耐力時の変位の2.5倍以下を確認

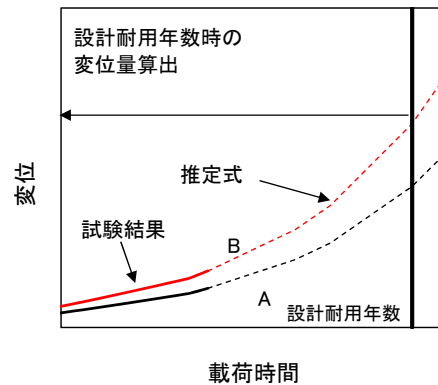


図 4-5-1 クリープ評価方法

(1) クリープ試験

あと施工アンカーのクリープ限度を算出する上で、4章3節4項においては、載荷荷重比3水準程度でクリープ限度の推定を行った。しかし、クリープ限度の精度およびアンカーの使用適用範囲を明確にするためには、4水準以上の試験を行うことが好ましいものと考えられる。

クリープ試験における載荷荷重範囲は、クリープ限度が含まれる範囲の試験を行う必要がある。クリープ限度の目安は、4章3節4項で示したように、有機系アンカーでは0.5程度、無機系アンカーでは0.6~0.7程度である。また、有機系アンカーでは、付着強度試験時における荷重-変位曲線の傾きが緩やかになり始める点があり、この載荷荷重もクリープ限度の目安となる。ここでは、実験を行う載荷荷重比の範囲を表4-5-1に提案する。

表 4-5-1 クリープ試験 載荷荷重比範囲

| | 載荷荷重比範囲(%) | | | |
|----------------|------------|-------|-------|-------|
| | A | B | C | D |
| 有機系注入式あと施工アンカー | 40-46 | 46-52 | 52-58 | 58-64 |
| 無機系注入式あと施工アンカー | 40-50 | 50-60 | 60-70 | 70-80 |

(2) クリープ限度の算出

4章3節4項のクリープ限度の算出において、載荷期間90日において有機系アンカーにおいて比較的明確にクリープ限度が確認されたが、無機系アンカーにおいては、若干不明確なところも存在した。しかし、4章3節2項では、載荷期間160日においては、明確な載荷荷重比と変位増加量に変曲点が認められており、無機系アンカーにおいて、クリープ限度を算出する場合には、有機系アンカーよりクリープ試験期間を長く行う必要性が生じる可能性はあり、クリープ試験の載荷期間としては、90日以上必要と考えられる。

(3) 設計耐用年数における変位量の推定

変位推定については、4章4節で明らかにしたように有機系アンカーと無機系アンカーではクリープ推定式を分ける必要がある。

有機系注入式あと施工アンカーでは、式(4-1)を無機系注入式あと施工アンカーでは、式(4-2)を適用し、設計対応年数時における伸び量を算出し、伸び量の確認を行う必要がある。

$$S(t) = S(0) + a \cdot t^b \quad \text{式 (4-1)}$$

$$S(t) = A \cdot \log_e(t+1) + B \quad \text{式 (4-2)}$$

表 4-5-2 クリープ試験方法案とその設定理由

| 項目 | 案 | 設定の理由 |
|------------|----------------------------|-----------------------------|
| 試験環境 | 恒温・恒湿環境下 | 温度、湿度変動による測定値への影響が大きいため |
| 試験装置 | ばね式クリープ試験装置推奨 | 恒温恒湿下で試験可能な装置 |
| 母材コンクリート強度 | 適用部材同等強度以下 | 母材コンクリート強度により、クリープ挙動が異なるため |
| アンカー筋 | 適用部位に使用する鉄筋と同じ径の高度鉄筋 | 鉄筋径により載荷荷重が異なり、クリープ挙動が異なるため |
| 埋込み長さ | アンカー筋が降伏しない範囲で出来るだけ長い埋込み長さ | 適正な付着強度範囲下での試験を行うため |
| 試験水準 | 荷重レベルの異なるもの4水準以上 | クリープ限度を推定するために、必要と思われる試験体数 |

ここに、
 $S(t)$: 時間 t における変位量
 $S(0)$: 載荷直後における変位量
 t : クリープ開始後の時間
 a, b, A, B : 実験によって求める定数

4. 5. 2 クリープ試験方法の提案

クリープ評価を正しく行うためには、適切なクリープ試験条件を設定する必要がある。そのための試験方法案を表 4-5-2 に示す。

(1) 試験環境

試験環境は、温度、湿度による変位測定への影響が大きいため、恒温恒湿環境下で試験を行う必要がある。本研究においても、空調設備のトラブル時の温度変化にともない変位が変動し、空調設備の正常化とともにもとの変位に戻っている。これらのことからクリープ試験の評価を行う試験環境は恒温・恒湿下とすべきである。

(2) 試験装置

本研究においては、ばね式クリープ試験装置を製作し、4章2節では、試験装置の精度について検証を行った。クリープ試験においては、測定する変位量が非常に小さいため、試験精度が確保されたものを使用する必要がある。また、恒温・恒湿室での試験環境化に設置できる試験装置として、カウンターウェイト方式は、設置場所が限られる。そのため、クリープ試験における精度を確認している本研究で提案したばね式クリープ試験装置を推奨する。

(3) 母材コンクリート強度

4章3節において、母材コンクリート強度によりクリープ挙動が異なることを明らかにした。このため試験においても適用部材と同等程度のコンクリート強度の試験体が好ましい。母材コンクリート強度が高い場合には、クリープ変形量が小さくなり、クリープを過小評価するため、適用部材同等強度以下とすべきと考える。

(4) アンカー筋

4章4節で、同一載荷荷重比では鉄筋径が大きい場合にクリープ変形量が大きくなっており、鉄筋径によりクリープ変形量に影響を及ぼすことが明らかとなった。そのため、クリープ評価をアンカーは、適用部位に使用する鉄筋を用いることが好ましい。しかし、あと施工アンカーの試験における引張試験で、鉄筋の破断の発生によりアンカー材としての評価が行えないため、クリープ試験においても、使用する鉄筋と同じ径の高強度鉄筋を使用すべきと考える。

(5) 埋込み長さ

あと施工アンカーの性能の評価においては、付着試験も同時に使用するため、アンカー筋が降伏しない範囲でできるだけ長い埋込み長さで試験を行う必要がある。

(6) 試験水準

クリープ限度を確認する上で、アンカーの使用適用範囲を明確にするためには、4水準以上の試験を行うことが好ましい。

第4章 まとめ

本章では、超速硬セメント系注入式アンカーを基礎材料として、製作したクリープ試験装置の検証を行い、その装置を用いて長期持続荷重が注入式アンカーのクリープ現象へ及ぼす各種要因について検討し、クリープ評価方法について検討を行った。

- 1) 製作したクリープ試験装置は、荷重開始時 (0kN) からの変位測定、目標の荷重荷重に対して 0.2kN 程度の誤差で荷重が可能であることを確認した。30kN 程度、90 日の持続荷重において、クリープ変形に伴う荷重荷重の低下はほとんどなく、所定の荷重荷重の±2%以下の精度での荷重可能であることを確認した。
- 2) クリープ試験装置の精度について、荷重開始 (0kN)から荷重荷重到達時までの荷重ー変位曲線は引張強度試験とほぼ同等であり、更にクリープ変位量と非回復クリープがほぼ同等であることから、高い試験精度を保有する装置であることを確認した。
- 3) 母材コンクリート強度がクリープ変形に及ぼす影響について、アンカー筋の抜き出し量は、コンクリート強度の影響を大きく受け、荷重荷重比 0.50 にて、母材コンクリート強度 24N/mm²のアンカー筋の抜き出し量は、46N/mm²のコンクリートの 2 倍程度であることを示した。
- 4) クリープ破壊直前の変位は、いずれの試験体においても付着強度試験の最大耐力時の変位より大きくなり、クリープ破壊に至る時間が長いほど、クリープ破壊時の変位は大きくなる傾向であることを明らかにした。
- 5) EOTA ETAG 001 Part5 によるクリープ評価方法を無機系注入式アンカーに適用した場合、クリープ限度より著しく小さい荷重荷重比においてもクリープ破壊の危険があるものと評価される可能性があり、付着強度試験時の変位が小さいものへの EOTA ETAG 001 Part5 による評価は、無機系材料に対して著しく安全側に評価することを示した。
- 6) 鉄筋径の違いについて、荷重荷重比の増加量に対する変位の増加割合は、鉄筋径によらず同等であることが確認されたが、荷重荷重はあと施工アンカーのクリープの絶対量に影響を与えることが判明し、クリープを評価する上で、荷重荷重を考慮する必要があることを示した。
- 7) 拘束試験と非拘束試験を比較した場合、同一荷重荷重比において、非拘束試験の変位

の方が拘束試験より大きく、自由端変位に対する載荷端端変位の割合は、拘束試験の方が大きくなることを示した。

- 8) 先付けアンカーの最大耐力以上でのあと施工アンカーへの長期持続載荷は、母材コンクリートにマイクロクラックを発生させることにより、クリープ試験後の耐力を低下させることを明らかにした。
- 9) クリープ破壊が生じない限界の荷重であるクリープ限度を、変位変化量と載荷荷重曲線の変曲点と仮定した場合、無機系注入式あと施工アンカーのクリープ限度は載荷荷重比 0.6~0.7 程度、有機系注入式あと施工アンカーのクリープ限度は載荷荷重比 0.5 程度であるものと推察した。
- 10) クリープ曲線から長期におけるクリープ変形量を指数関数および対数関数により推定を行った場合、載荷材齢 50 年において、指数関数により推定した値は、対数関数で推定した値の 1.3 倍程度大きな変形量の推定値となることを示した。
- 11) クリープ曲線からの変位推定方法を検証し、有機系注入式あと施工アンカーでは ACI, ETAG で適用されている指数関数が、無機系注入式あと施工アンカーでは JIS のコンクリート圧縮クリープ試験方法等で適用されている対数関数の適用が妥当であることを示した。
- 12) クリープ評価方法について、載荷荷重比の異なる試験を行うことにより、クリープ限度を推定し、クリープ限度からのクリープ評価を行う方法を提示した。また、そのためのクリープ試験方法についても提示した。

第4章の参考文献

- [4-1] 国土交通省：平成22年度建築基準整備促進事業最終成果報告書－あと施工アンカーの長期許容応力度に関する検討調査－,2011
- [4-2] European Organization for Technical Approval : ETAG 001 GUIDLINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL OF METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE Part 5 BONDED ANCHORS, Feb.2013
- [4-3] 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，2010改訂版
- [4-4] American Concrete Institute : ACI355.4-11 Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete, Aug.2011
- [4-5] European Organization for Technical Approval : ETAG 001 GUIDLINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL OF METAL ANCHORS FOR USE IN CONCRETE Annex A DETAILS OF TEST, Jun.2013
- [4-6] 例えば，加藤雅治，熊井真次，尾中晋：材料強度学，朝倉書店，1999.3
- [4-7] Findley, W. N.: Mechanism and Mechanics of Creep of Plastics, Society of Plastics Engineers Journal, pp.57-65, 1960
- [4-8] 松崎育弘，阿部保彦，宇佐見滋：ポリステル系樹脂アンカーの長期持続引張荷重による限界耐力（常温及び65 の場合），日本建築学会関東支部研究報告集，pp.249-252，1981.3
- [4-9] 日本工業規格 JIS A 1157（コンクリートの圧縮クリープ試験方法）,2006
- [4-10] 西林新蔵，阪田憲次：コンクリートの破壊に関する研究，会誌「材料」，Vol.26，No.290，pp.1091-1096，日本材料学会，1977.

第5章

結論

5.1 本研究における結論

本論文は、これまでの研究がおこなわれてこなかった無機系注入式あと施工アンカーに関する接着性能および長期持続耐久性能について、一連の研究成果をまとめたものである。

アンカー材の物性とアンカー筋の付着特性に関する関係性を調べ、アンカー材としての必要性能を把握し、現在使用されている無機系注入式あと施工アンカーの一つである超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの性能確認を行った。更に注入式あと施工アンカーのクリープ挙動に関する各種試験を実施し、その耐久性能およびクリープ評価方法を提案した。

本研究によって得られた結論を以下に列挙する。

第2章【無機系注入式あと施工アンカーの付着メカニズム】では、アンカー材の材料配合を変化させて、膨張材の影響、乾燥収縮率の影響、保水性能の影響を確認し、付着力と材料特性の関係について考察を行い、以下の結論が得られた。

- (1) アンカー材の付着性能について、アンカー材の保水率とアンカー筋の引抜き付着強度に相関性があることを明らかにし、コンクリート-アンカー材界面に形成される脆弱層が、付着強度に大きく関係することを解明した。
- (2) アンカー材に膨張性能を保有させることにより、コンクリート-アンカー材界面に脆弱層が形成された場合でも脆弱層を低減させる効果により、アンカー筋引抜き付着強度付着強度は、膨張性能を有しないものより高くなるものの、アンカー材の保水能力が低い場合には、付着強度のばらつきは大きいことを示した。
- (3) 無機系あと施工アンカー材の必要性能である圧縮強度と保水率の基準値を提示した。

第3章【超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの開発】では、無機系注入式アンカーで主流となっている超速硬セメント系注入式アンカーについて、材料の基本物性値を把握し、アンカー材としての付着力の検証を行った。

- (1) 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着強度は、コンクリート強度 $20\sim 50\text{N/mm}^2$ の範囲において、アンカーの設計で使用される基本平均付着強度 ($\tau_{bavg}=10\sqrt{(\sigma_B/21)}$) の1.6倍以上であることを示した。
- (2) 施工による影響について、上向き、横向き、下向きの施工方向の違いによる付着強度には差が認められず、付着強度は 27N/mm^2 以上であり、その変動係数は5%以下と小さなものであることを示した。
- (3) 穿孔径の2倍程度までは、穿孔径が大きくなることによる付着強度に与える影響は認められないことを示した。

第4章【超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの長期持続荷重に関する評価】では、

ばね式クリープ試験装置を製作し、製作したクリープ試験装置の検証を行った。その装置を用いて長期持続荷重が注入式あと施工アンカーのクリープ挙動へ及ぼす各種の要因について検討し、クリープ評価方法について提示した。

- (1) 製作したクリープ試験装置は、荷重開始時 (0kN) からの変位測定および所定の載荷荷重の±2%以下の精度での荷重が可能であることを確認した。また、荷重開始前から載荷試験到達時までの荷重-変位曲線は引張強度試験とほぼ同等であること、クリープ変位と回復クリープがほぼ同等であることから、製作したクリープ試験装置は精度を有する事を証明した。
- (2) 長期持続荷重によるアンカー筋の拔出量は、コンクリート強度の影響を大きく受け、載荷荷重比 50%において、母材コンクリート強度 24N/mm²のアンカー筋の拔出量は、46N/mm²のコンクリートの2倍程度であることを示した。
- (3) クリープ破壊直前の変位は、いずれの試験体においても付着強度試験の最大耐力時の変位より大きくなり、クリープ破壊に至る時間が長いほど、クリープ破壊時の変位は大きくなる傾向を明らかにした。
- (4) EOTA ETAG 001 Part5 によるクリープ評価方法を無機系注入式アンカーに適用した場合、クリープ限度より著しく小さい載荷荷重比においてもクリープ破壊の危険があるものと評価される可能性があり、付着強度試験時の変位が小さいものへの EOTA ETAG 001 Part5 による評価は、無機系材料に対して著しく安全側に評価すること可能性があることを示した。
- (5) 鉄筋径の違いについて、載荷荷重比の増加量に対する変位の増加割合は、鉄筋径によらず同等であることが確認されたが、載荷荷重はあと施工アンカーのクリープの絶対量に影響を与えることが判明し、クリープを評価する上で、載荷荷重を考慮する上で必要があることを示した。
- (6) 異なる載荷荷重比によるクリープ試験結果より、クリープ破壊が生じない限界の荷重であるクリープ限度は、無機系アンカーでは載荷荷重比 0.6~0.7 程度、有機系アンカーのクリープ限度は載荷荷重比 0.5 程度であるものと推察した。
- (7) クリープ曲線からの変位推定方法を検証し、有機系アンカーでは EOTA ETAG 001 Part5 で適用されている指数関数が、無機系アンカーでは JIS のコンクリート圧縮強度試験等で適用されている対数関数の適用が妥当であることを示した。
- (8) 注入式アンカーのクリープ現象へ及ぼす各種要因について検討した結果より、クリープ限度を推定することによるクリープ評価方法を提示した。

5.2 今後の課題

本研究において、これまで研究が行われてこなかった無機系注入式あと施工アンカーについて、材料特性と付着力の関係を調べ、無機系注入式あと施工アンカーの接着機構を推定するとともに無機系注入式あと施工アンカーで主流となっている超速硬セメント系アンカーの付着力の検証を行った。さらに、超速硬セメント系あと施工アンカーについて長期持続荷重評価を実施し、クリープ挙動に与える各種要因を検討し、注入式あと施工アンカーのクリープ特性を明らかにした。

本研究においては、標準施工、標準環境下で試験を実施し評価を行った。しかし、あと施工アンカーの接着性能は、施工条件、環境条件に影響を受ける。このため施工条件、環境条件を含めた評価が必要であり、様々な条件下での安全性を確認することにより、高いあと施工アンカーの提供に貢献できるものと考えている。そのためには、施工条件による影響、環境条件による影響についても評価を行う必要がある。

クリープ評価について、有機系アンカーでは温度の影響がクリープ挙動に大きな影響を与えることが考えられ、無機系アンカーでは水分がクリープに影響を与えるが考えられる。これらの環境条件がクリープ変形量に及ぼす影響は、アンカーの適用範囲を設定する上で重要なものであり、今後、さらに検討すべき課題である。

また、耐久性について、疲労、凍結融解等の影響についても不明な点が多く残されている。これらについては、近年検証試験が実施されてはいるものの、試験方法・評価方法が確立しておらず、今後耐久性に関する試験・評価方法の確立が望まれる。

また、安心してアンカーを使用するために、材料、環境温度、環境条件を体系的に捉え、環境作用と力学作用の面から検討が必要と考えている。今後、長期持続荷重下における環境条件の影響についてさらに検討を行い、第4章で示した評価手法の適用性についてさらに検討を進めていきたいと考えている。

本論文に関連する著者の発表論文・報告

1. 本論文に関する著者の発表論文・報告(査読あり)

- (1) 安藤重裕, 中野克彦, 渡辺一弘: 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの環境および施工条件が付着強度に及ぼす影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 第 35 巻, 第 2 号, pp.535- 540, 2013
- (2) 山田宏, 中野克彦, 渡辺一弘, 安藤重裕: 超速硬セメント系あと施工アンカーの定着機構に関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 13 巻, pp.349-356, 2013.11
- (3) 安藤重裕, 中野克彦, 渡辺一弘, 山田宏: 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーのクリープ特性, コンクリート工学年次論文集, 第 36 巻, 第 1 号, pp.550-555, 2014
- (4) 川上明大, 安藤重裕, 中野克彦, 渡辺一弘: 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの引抜き耐力に及ぼすひび割れの影響, コンクリート工学年次論文集, 第 36 巻, 第 1 号, pp.1894-1899, 2014
- (5) 安藤重裕, 山田宏, 中野克彦, 濱崎仁, 田沼毅彦: あと施工アンカーの引張クリープ試験方法の基礎的評価, 日本建築学会技術報告集, 第 21 巻, 第 47 号, pp.7-10, 2015. 2
- (6) 安藤重裕, 中野克彦: 接着系あと施工アンカーのクリープ特性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 第 38 巻, 第 1 号, pp.1977-1982, 2016

2. 本論文に関する著者の発表論文・報告(査読なし)

- (1) 安藤重裕, 中野克彦, 渡辺一弘, 中川博光, 田沼毅彦, 矢幡秀介, 榊原弘幸, 赤坂哲司: 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.201-202, 2012.09
- (2) 武藤貴彦, 中野克彦, 渡辺一弘, 中川博光, 田沼毅彦, 矢幡秀介, 安藤重裕, 川上明大: 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性 その2 養生条件および下地の乾燥条件による影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.77-78, 2013.08
- (3) 川上明大, 中野克彦, 渡辺一弘, 中川博光, 田沼毅彦, 矢幡秀介, 安藤重裕, 武藤貴彦: 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性 その3 埋込み長さ, 穿孔径および穿孔深さによる影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.79-80, 2013.08
- (4) 安藤重裕, 中野克彦, 渡辺一弘, 中川博光, 田沼毅彦, 矢幡秀介, 川上明大, 武藤貴彦: 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性 その4 高温下における付着強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.81-82, 2013.08
- (5) 安藤重裕, 中野克彦, 渡辺一弘, 中川博光, 田沼毅彦, 矢幡秀介, 兼吉孝征, 山田宏: 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性 その5 疲労耐久性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.659-660, 2014.09
- (6) 兼吉孝征, 中野克彦, 渡辺一弘, 中川博光, 田沼毅彦, 矢幡秀介, 安藤重裕, 山田宏: 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性 その6 クリーブ特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.661-662, 2014.09
- (7) 山田宏, 中野克彦, 渡辺一弘, 田沼毅彦, 矢幡秀介, 兼吉孝征, 安藤重裕, 川上明大: コンクリートのひび割れによるアンカー引抜耐力の低減率に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.649-650, 2014.09
- (8) 山田宏, 中野克彦, 渡辺一弘, 田沼毅彦, 安藤重裕, 兼吉孝征: 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性, 土木学会第69回年次学術講演会, 第V部門, pp.481-482, 2014.09
- (9) 安藤重裕, 中野克彦, 渡辺一弘, 田沼毅彦, 兼吉孝征, 山田宏: 大口径および太径アンカー筋に対するセメント系あと施工アンカーの付着強度特性, 土木学会第69回年次学術講演会, 第V部門, pp.479-480, 2014.09
- (10) 安藤重裕, 中野克彦, 渡辺一弘, 田沼毅彦, 矢幡秀介, 兼吉孝征, 田村努: 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性 その7 付着疲労耐久性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.251-252, 2015.09
- (11) 田村努, 中野克彦, 渡辺一弘, 田沼毅彦, 矢幡秀介, 兼吉孝征, 安藤重裕: 超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性 その8 鉄筋径によるクリー

- ブ特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.253-254，2015.09
- (1 2) 安藤重裕，中野克彦，有木克良：あと施工アンカーのばね式引張クリーブ試験方法およびクリーブ特性評価に関する検討，あと施工アンカーの耐久性評価と設計方法の高度化に関するシンポジウム，pp.233-238，2016.06
- (1 3) 安藤重裕，中野克彦，田沼毅彦，有木克良，兼吉孝征，田村努：超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性 その9 付着強度ばらつき評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.551-552，2016.08
- (1 4) 田村努，中野克彦，渡辺一弘，田沼毅彦，有木克良，矢幡秀介，兼吉孝征，安藤重裕：超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性 その10 引張強度評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.553-554，2016.08
- (1 5) 安藤重裕，中野克彦，渡辺一弘，田沼毅彦，有木克良，矢幡秀介，兼吉孝征，田村努：超速硬セメント系注入式あと施工アンカーの付着特性 その11 非拘束試験によるクリーブ特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，pp.555-556，2016.08

3. 本論文に関する著者の国際学会発表論文

- (1) S. Ando, T. Tamura, K. Nakano and T. Tanuma: Studies on creep deformation of ultra-rapid-hardening cement-type bonded anchor, Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV, pp.379-387, 2016
- (2) K. Nakano, S. Ando and M. Tokushige: CREEP DEFORMATION OF POST-INSTALLED BONDED ANCHORS, 16th World Conference on Earthquake, 2017.01

4. 本論文に関する著者の国際学会 口頭発表

- (1)S. Ando: Characteristics of rapid hardening cement type post-installed bonded anchor, The 37th meeting of fib SAG4,2012.05 (Kyoto)
- (2)S. Ando, Y. Matsuzaki and K. Nakano: Creep test of post-installed bonded anchor – Creep behavior of rapid hardening cement type post-installed bonded anchor -, The 38th meeting of fib SAG4,2013.05 (Helsinki)
- (3)S. Ando and K. Nakano: Creep behaviour of a rapid hardening cement type post-installed bonded anchor Part2, The 39th meeting of fib SAG4, 2014.09 (Paris)
- (4)S. Ando, T. Tamura, K. Nakano and T. Tanuma: Creep Deformation of Ultra-Rapid-Hardening Cement-Type Bonded Anchors Part 3, The 42th meeting of fib TG2.9, 2015.10 (Milano)

謝辞

本論文は、無機系注入式あと施工アンカーについての研究成果を取りまとめたものであり、本研究の遂行に関して、多くの方々からの貴重なご指導、ご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

千葉工業大学 中野克彦教授には、材料系の分野にもかかわらず社会人学生として受け入れて頂くとともに、浅学非才な私に本研究の遂行ならびに本論文の取りまとめにあたり、懇切なるご指導を賜り、あと施工アンカーの研究の幅を広げる多くの示唆をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

論文の審査を通じて、千葉工業大学 田村和夫教授、山田丈富教授、藤井賢志教授並びに芝浦工業大学 濱崎仁准教授には、本論文の作成、審査にあたり、適切なお指摘と貴重なご教授を賜りました。心より感謝と御礼を申し上げます。

また、筆者が千葉工業大学大学院の社会人博士課程の学生として、研究に取り組む機会を与えていただいた住友大阪セメント株式会社の関係各位に厚く感謝の意を表します。このような機会を与えていただくとともに、多大な支援とご配慮をいただきました榊原弘幸執行役員セメント・コンクリート研究所長に改めて感謝の念を表します。

セメント・コンクリート研究所関連製品研究グループ 大野グループリーダー、田村努氏、川上明大氏、建材事業部 兼吉孝征氏、エステック（株）吉原正博氏、広島県広島港湾振興事務所 山田宏氏、職場の方々には研究を遂行するにあたり、多大なるご協力をいただきました。ここに、厚く感謝の意を表します。

千葉工業大学での本研究におきましては、石橋一彦名誉教授、博士課程 徳重充氏、その他研究室の卒業生および現役の皆さんのおかげで有意義な研究生活を送ることができました。ここに感謝の意を表します。

本論文の完成にあたり、共同研究者、委員会関係者等の様々な方からの意見も参考にさせていただきました。本論文は、このように多くの方々のご指導、ご支援をもとに達成されたものであり、ここに謹んで御礼申し上げます

最後に、これまで暖かく見守り、笑顔を絶やさず励まし続けてくれた妻に感謝の意を表し、謝辞といたします。

平成 29 年 3 月